Editora
Bernoulli
FÍSICA
Volume 02

Sumário - Física

Frente A

03 3 Introdução à Cinemática vetorial
Autor: Francisco Pazzini Couto

04 15 Lançamento horizontal e lançamento oblíquo
Autor: Francisco Pazzini Couto

Frente B

03 25 Calorimetria
Autor: Luiz Machado

04 37 Gases
Autor: Luiz Machado

Frente C

03 47 Espelhos esféricos
Autor: Lívio Ribeiro Canto

04 57 Refração da luz
Autor: Lívio Ribeiro Canto

Frente D

04 69 Trabalho e potencial elétrico
Autores: Luiz Machado
Lívio Ribeiro Canto

05 81 Condutores
Autores: Luiz Machado
Lívio Ribeiro Canto

06 91 Corrente elétrica
Autores: Luiz Machado
Lívio Ribeiro Canto

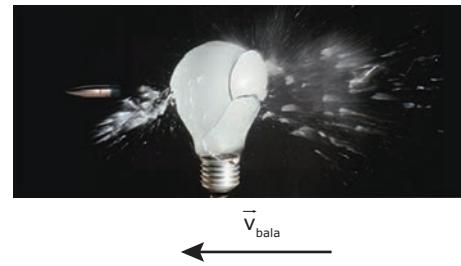
FÍSICA

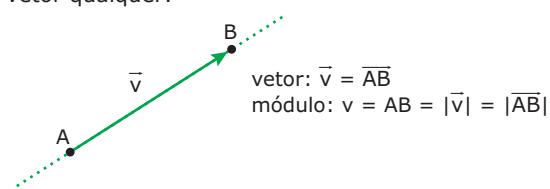
MÓDULO 03 FRENTE A

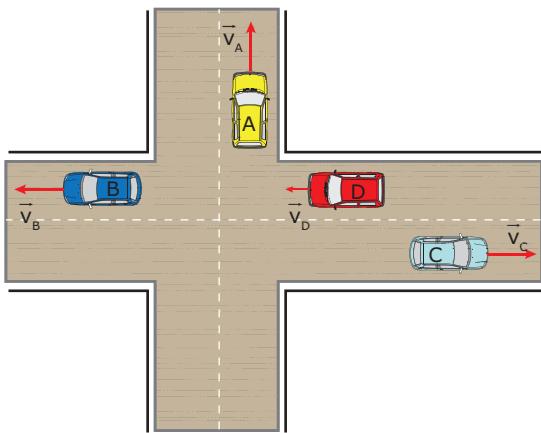
Introdução à Cinemática vetorial

Imagine-se de pé em um ponto da sala em que você está agora e obedecendo ao seguinte comando: dê 3 passos a partir do local em que se encontra; posteriormente, dê mais 4 passos e, por último, mova-se mais 5 passos. Após efetuar esses movimentos, é possível responder a quantos passos você estaria da posição inicial? 12 passos? 2 passos? No mesmo local em que iniciou a caminhada? As opções anteriores são apenas três de inúmeras possíveis respostas para essa situação. Uma resposta seguramente correta só pode ser dada com o conhecimento de uma informação fundamental: **para onde** foram dados os passos? Algumas grandezas físicas, como o deslocamento, somente ficam bem definidas se indicarmos além de seu valor numérico, seguido de sua unidade, sua direção e seu sentido. Se tais indicações não são feitas, a informação é incompleta e, portanto, incorreta.

Este módulo introduzirá uma ferramenta fundamental – o vetor – para o estudo de grandezas físicas que, para ficarem completamente definidas, necessitam que sejam especificados seu módulo (valor numérico com unidade de medida), sua direção e seu sentido. Algumas dessas grandezas físicas você já conhece, como a velocidade, o deslocamento, a aceleração e a força. Outras você virá a conhecer, como o campo elétrico e o campo magnético.

GRANDEZAS ESCALARES E GRANDEZAS VETORIAIS

Existem grandezas na Ciência que ficam bem determinadas apenas com o fornecimento de seu valor numérico e sua respectiva unidade, como o volume, a massa, a temperatura e os intervalos de tempo. Essas grandezas são denominadas **grandezas escalares**.

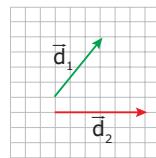
Outra classe de grandezas, **as grandezas vetoriais**, exige que informemos algo a mais além de seu **módulo**: sua **direção** e seu **sentido**. Quando se pede a uma pessoa para se deslocar 5 passos da posição onde se encontra, faz todo o sentido perguntar: "Para onde?" A pessoa pode dar 5 passos para frente, para trás, para a direita, para a esquerda, etc. A fotografia a seguir mostra uma bala movendo-se na direção horizontal, cujo sentido é da direita para a esquerda, com velocidade instantânea de 100 m/s. Como já dito, as grandezas vetoriais só ficam completamente definidas quando informamos seu módulo, sua direção e seu sentido. Logo, a velocidade da bala está completamente definida.

Vetor

Para representarmos graficamente as grandezas vetoriais, utilizamos os **vetores**, que são segmentos de reta orientados. Na fotografia da bala furando uma lâmpada, a velocidade da bala seria representada pelo vetor a seguir:

Markus Kempf, Frank Bastian / Wikimedia Commons

$\vec{v}_{bala}$

O vetor carrega consigo todas as informações necessárias para definir as grandezas vetoriais: o módulo está associado ao comprimento do segmento de reta (na figura anterior, cada 1 cm representa 50 m/s), a direção do vetor é a direção do segmento de reta (direção horizontal), e o sentido é fornecido pela seta (sentido da direita para a esquerda). Veja a seguir algumas convenções estabelecidas para representar um vetor qualquer:

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. A figura a seguir representa os vetores velocidade de quatro automóveis em uma esquina. Marcar a(s) alternativa(s) que contém apenas afirmativas corretas.

A) $\vec{v}_B$ e $\vec{v}_D$ têm mesma direção.

B) $\vec{v}_B$ e $\vec{v}_C$ têm mesma direção.

C) $\vec{v}_B$ e $\vec{v}_D$ têm mesma direção e sentidos opostos.

D) $\vec{v}_A$ e $\vec{v}_D$ têm mesmo sentido.

E) $\vec{v}_C$ e $\vec{v}_D$ têm direção e sentidos opostos.

F) $\vec{v}_A$ e $\vec{v}_C$ têm módulos diferentes.

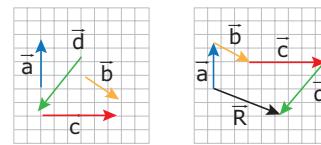
G) $\vec{v}_B$ e $\vec{v}_D$ são iguais.

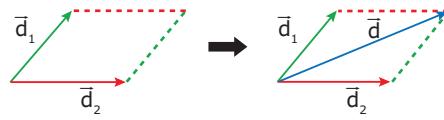
***Resolução*:**

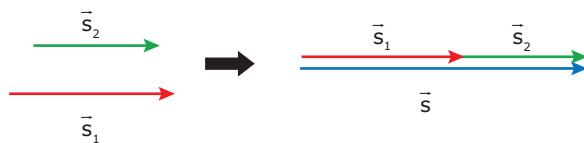
Dois ou mais vetores possuem a mesma direção quando são paralelos. Logo, apenas os vetores velocidade dos carros B, C e D possuem a mesma direção. Para que dois ou mais vetores tenham o mesmo sentido, esses devem estar na mesma direção e devem estar orientados para o mesmo lado. Assim, temos que apenas os vetores $\vec{v}_B$ e $\vec{v}_D$ possuem o mesmo sentido. Sabemos, também, que dois vetores possuem módulos diferentes quando os segmentos de reta que os representam possuem comprimentos diferentes. Como os vetores $\vec{v}_A$, $\vec{v}_B$ e $\vec{v}_C$ possuem o mesmo comprimento, as velocidades de $\vec{v}_A$, $\vec{v}_B$ e $\vec{v}_C$ possuem também o mesmo módulo. Já o vetor $\vec{v}_D$ possui módulo menor que os demais. Dois vetores são iguais quando possuem mesmo módulo, direção e sentido. Tendo em vista os comentários anteriores, temos que as afirmativas corretas são A e B.

Adição vetorial

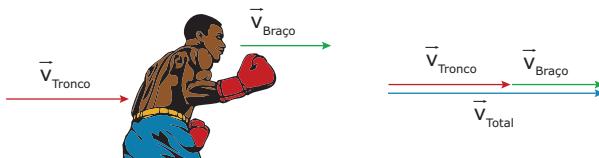
Assim como as grandezas escalares, as grandezas vetoriais também estão submetidas a regras de operações matemáticas, como adição, subtração, multiplicação, etc. Estudaremos dois processos para a realização de adições vetoriais: o método da poligonal ou o método do paralelogramo. Consideremos dois vetores deslocamento, $\vec{d}_1$ e $\vec{d}_2$, mostrados na figura a seguir.

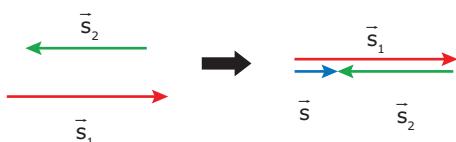
Vejamos, então, os dois processos pelos quais pode ser realizada a soma vetorial dos vetores $\vec{d}_1$ e $\vec{d}_2$.

1º método: Poligonal

Para realizarmos a soma vetorial $\vec{d} = \vec{d}_1 + \vec{d}_2$, pelo método da poligonal, devemos desenhar a origem do vetor $\vec{d}_2$ na extremidade do vetor $\vec{d}_1$. O vetor soma $\vec{d}$ dos deslocamentos $\vec{d}_1$ e $\vec{d}_2$ é o segmento de reta cuja origem é a origem de $\vec{d}_1$ e cuja extremidade é a extremidade de $\vec{d}_2$, como representado na figura a seguir. Ao mover os vetores $\vec{d}_1$ e $\vec{d}_2$, não podemos alterar seus módulos, suas direções, nem seus sentidos.

Para determinarmos o módulo de $\vec{d}$, devemos utilizar uma escala anteriormente fornecida para os módulos dos vetores $\vec{d}_1$ e $\vec{d}_2$ ou aplicar a Lei dos Cossenos. O vetor $\vec{d}$ é denominado vetor resultante ou vetor soma. Posteriormente, serão dados alguns exemplos numéricos.

Esse método de soma vetorial nos permite somar mais de dois vetores ao mesmo tempo. Se tivéssemos quatro vetores, como os representados na figura seguinte, para realizarmos a soma vetorial $\vec{R} = \vec{a} + \vec{b} + \vec{c} + \vec{d}$, bastaria procedermos de forma análoga, isto é, sempre desenhar a origem do vetor seguinte na extremidade do vetor anterior, tomando o cuidado de não alterar os módulos, as direções e os sentidos dos vetores. O vetor resultante dessa operação seria um vetor, cuja origem seria a origem de $\vec{a}$ e cuja extremidade seria a extremidade de $\vec{d}$, conforme a figura a seguir.

2º método: Paralelogramo

A soma vetorial $\vec{d} = \vec{d}_1 + \vec{d}_2$ realizada, pelo método do paralelogramo, é feita desenhando os vetores $\vec{d}_1$ e $\vec{d}_2$ com a mesma origem e traçando um paralelogramo a partir desses vetores. O vetor soma $\vec{d}$ terá como origem a origem dos vetores $\vec{d}_1$ e $\vec{d}_2$ e, como extremidade, a interseção dos dois segmentos paralelos aos vetores $\vec{d}_1$ e $\vec{d}_2$. Veja a figura a seguir:

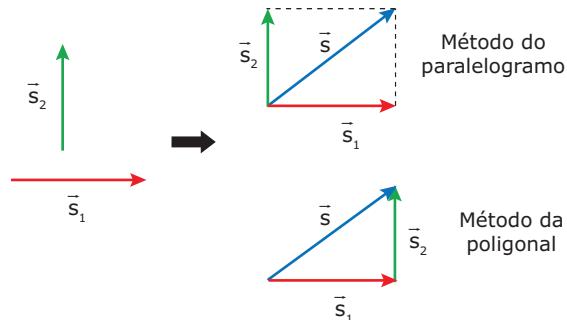
Obviamente, os dois métodos de soma vetorial apresentados devem conduzir ao mesmo resultado, isto é, o vetor $\vec{d}$ obtido pelos dois métodos deve ter o mesmo módulo, a mesma direção e o mesmo sentido. Quando desejarmos somar mais de 2 vetores, o método da poligonal deverá ser utilizado, pois o método do paralelogramo somente permite somar 2 vetores de cada vez. Vejamos agora três exemplos numéricos associados à soma de vetores. Sejam os vetores $\vec{s}_1$ e $\vec{s}_2$ mostrados a seguir, que representam o deslocamento de uma pessoa, com módulos iguais a 4 u e 3 u, respectivamente. A escala utilizada para representar os vetores é de 1 cm para cada 2 u (u = unidade arbitrária).

1º exemplo: vetores de mesma direção e de mesmo sentido

Operação: $\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$

Módulo de $\vec{s} = |\vec{s}| = s = s_1 + s_2 = 4\text{ u} + 3\text{ u} = 7\text{ u}$

Esse exemplo pode ser aplicado em várias situações físicas. Quando um boxeador aplica um soco em seu oponente, ele não move apenas o seu braço, mas também o seu tronco, ou seja, a velocidade do soco aplicado é resultado da soma vetorial da velocidade do tronco com a velocidade do braço. O resultado é... muita dor!

O mesmo processo ocorre quando andamos em uma escada rolante no mesmo sentido do movimento da escada, ou quando um barco desce um rio a favor da correnteza. Nesses casos, devemos somar os módulos das velocidades para encontrar o módulo da velocidade resultante.

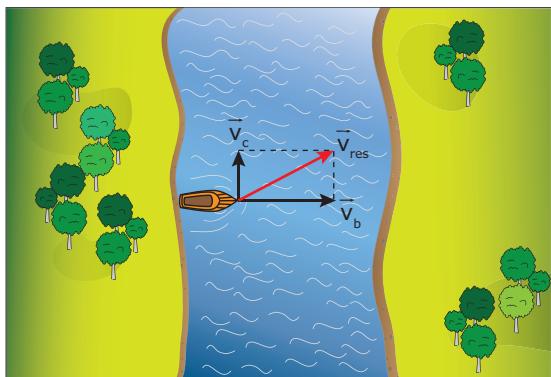
2º exemplo: vetores de mesma direção e de sentidos opostos

Operação: $\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$

Módulo de $\vec{s} = |\vec{s}| = s = s_1 - s_2 = 4\text{ u} - 3\text{ u} = 1\text{ u}$

Várias são as situações físicas nas quais encontramos uma operação vetorial como a mencionada nesse segundo exemplo. Um barco subindo um rio contra a correnteza, um avião movendo-se no sentido oposto ao do vento ou uma pessoa andando na "contramão" de uma escada rolante são exemplos de situações cotidianas em que a velocidade resultante é obtida por meio da soma de dois vetores velocidade com mesma direção e sentidos opostos.

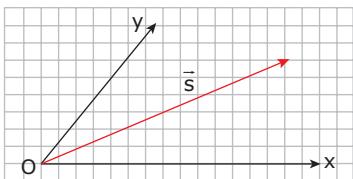
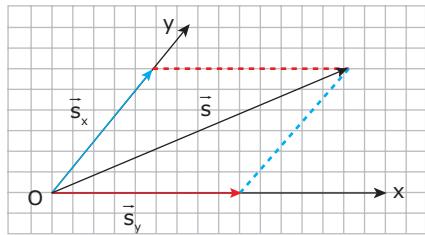
Suponha que a velocidade de um barco imprimida pelo seu motor seja de 25 km/h, e que o barco se encontra subindo o rio, cuja correnteza apresenta uma velocidade de valor igual a 5 km/h. Uma pessoa na margem do rio observará o barco mover-se a uma velocidade de 20 km/h, uma vez que os vetores velocidade do barco e da correnteza apresentam mesma direção e sentidos opostos. É por isso que em uma viagem de barco entre Manaus e Belém gasta-se, aproximadamente, 4 dias na ida, enquanto que, na volta, gasta-se, aproximadamente, 5 dias de viagem.

3º exemplo: vetores perpendiculares entre si

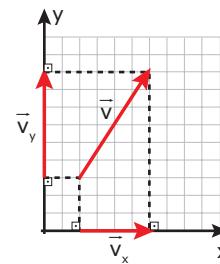
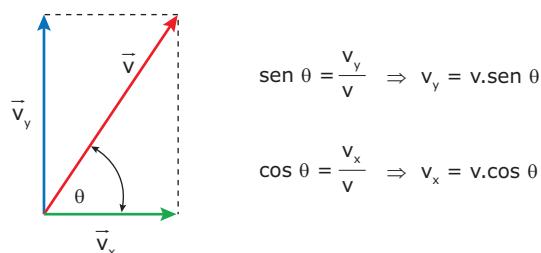
Considere agora duas pessoas arrastando um objeto por meio de duas cordas que formam um ângulo de 90º entre si, sendo que uma pessoa exerce uma força de 4 N e outra, uma força de 3 N. Qual o valor da força resultante? O diagrama a seguir representa a situação descrita. Utilizando os dois métodos de soma de vetores anteriormente apresentados, temos:

Operação: $\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$

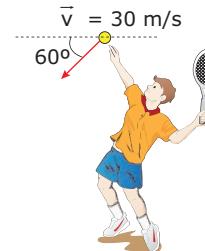
Módulo de $\vec{s} = |\vec{s}| = s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5\text{ N}$

Observe que os dois métodos de soma vetorial conduzem à mesma resposta: o vetor resultante possui o mesmo módulo, a mesma direção e o mesmo sentido, qualquer que seja o processo utilizado para realizar a soma. A soma de dois vetores perpendiculares entre si é um processo muito útil, por exemplo, quando desejamos determinar a velocidade resultante de um barco em relação à margem de um rio, quando o barco pretende atravessar o rio de uma margem a outra.

Considere um barco atravessando um rio, cuja velocidade da correnteza é $v_c = 6$ km/h. O barco possui um motor que o impulsiona em uma direção perpendicular às margens do rio, com velocidade de módulo $v_b = 8$ km/h, em relação à água, como mostra a figura a seguir.

Para determinarmos o módulo da velocidade resultante do barco em relação à margem, $\vec{v}_{res}$, basta realizarmos a soma vetorial da velocidade do barco em relação à água, $\vec{v}_b$, com a velocidade da correnteza em relação à margem, $\vec{v}_c$. Realizando tal soma vetorial, encontramos a velocidade resultante do barco em relação à água, cujo módulo é de 10 km/h.

Quando desejamos somar dois vetores, cujos ângulos são diferentes de 0°, 180° ou 90°, devemos usar a Lei dos Cossenos, cuja utilização não será descrita neste módulo.

Decomposição de um vetor

Considere o vetor $\vec{s}$ representado a seguir e os eixos x e y, que se cruzam no ponto O, origem do vetor $\vec{s}$.

Tendo em vista o método do paralelogramo, podemos supor que o vetor $\vec{s}$ é o resultado da soma vetorial de dois vetores $\vec{s}_x$ e $\vec{s}_y$, contidos nos eixos x e y, respectivamente.

Os vetores $\vec{s}_x$ e $\vec{s}_y$ são denominados componentes do vetor $\vec{s}$ na direção dos eixos x e y, respectivamente.

Muitas vezes é útil decompor um vetor em seus vetores componentes. Existem vários tipos de decomposição de vetores e, neste módulo, descreveremos a **decomposição ortogonal**, na qual um vetor é decomposto em suas partes constituintes, segundo eixos perpendiculares entre si.

Os vetores $\vec{v}_x$ e $\vec{v}_y$, resultantes da decomposição do vetor $\vec{v}$, são denominados componentes ortogonais do vetor $\vec{v}$ ou projeções do vetor $\vec{v}$ nos eixos x e y, respectivamente. É importante ressaltar que, ao decompor o vetor $\vec{v}$, este deixa de existir. Ou seja, ou temos o vetor $\vec{v}$, ou temos seus componentes $\vec{v}_x$ e $\vec{v}_y$. Os módulos dos componentes do vetor $\vec{v}$ podem ser encontrados utilizando-se as relações trigonométricas nos triângulos retângulos:

$$\text{sen}\ \theta = \frac{v_y}{v} \Rightarrow v_y = v.\text{sen}\ \theta$$

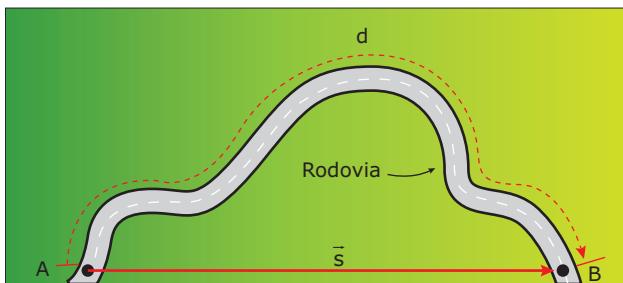
$$\cos\theta = \frac{v_x}{v} \Rightarrow v_x = v.\cos\theta$$

EXERCÍCIO RESOLVIDO

02. Um jogador de tênis efetua um saque, imprimindo na bola uma velocidade de 30 m/s, como ilustra a figura. Calcular a componente da velocidade responsável pelo deslocamento horizontal da bola.

Dados: sen 60º = 0,86 e cos 60º = 0,5

Resolução:

A componente da velocidade responsável pelo deslocamento horizontal da bola é a projeção do vetor velocidade sobre o eixo horizontal. Seu módulo é determinado pela relação:

$$v_x = v.\cos 60 = 30\ \text{m/s}.\cos 60º = 30\ \text{m/s}.0{,}5 = 15\ \text{m/s}$$

Vimos que as grandezas deslocamento e velocidade, entre outras, são grandezas vetoriais. Vamos agora ampliar nosso entendimento a respeito dessas grandezas.

DESLOCAMENTO VETORIAL

Os conceitos de distância percorrida e de deslocamento são diferentes. Por exemplo, ao realizarmos uma volta completa ao mundo, tendo como ponto de partida e de chegada a mesma posição, nosso deslocamento será nulo, em contrapartida à distância percorrida, que não será nula.

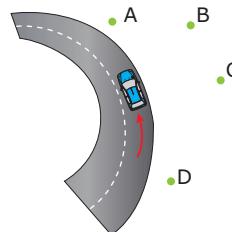
Denominamos de deslocamento vetorial $\vec{s}$ o vetor cuja origem coincide com o ponto de partida do movimento de um corpo, e cuja extremidade coincide com o ponto de chegada do movimento desse. Considere um carro viajando de uma cidade A para outra cidade B, como representado na figura a seguir, em que $\vec{s}$ representa o deslocamento vetorial e d representa a distância percorrida.

Observe que, nessa situação, o módulo do vetor deslocamento $\vec{s}$ é menor que a distância percorrida. Isso evidencia um fato importante: o módulo do deslocamento vetorial nem sempre coincide com o valor da distância percorrida d. Esses só serão coincidentes quando a trajetória for retilínea.

VELOCIDADE VETORIAL

A imagem seguinte mostra um esmeril lançando fagulhas metálicas que se encontram a altas temperaturas. Essas fagulhas são pedacinhos incandescentes que se desprendem tanto do metal lixado quanto do esmeril.

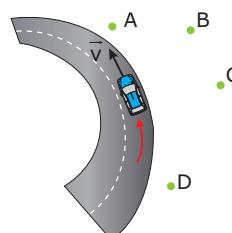
Observe que o esmeril está girando, e a trajetória das fagulhas é tangente à trajetória dos pontos do esmeril, que estão em contato com o metal. Uma fagulha que se solta do esmeril no ponto P apresenta um vetor velocidade com as seguintes características:

Módulo: igual ao módulo da velocidade escalar instantânea do ponto P.

Direção: tangente à trajetória do ponto P.

Sentido: o mesmo sentido do movimento do ponto P.

Tendo em vista as características anteriores, conclui-se um importante fato: o vetor velocidade de um corpo em movimento é sempre tangente à trajetória do corpo.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

03. (UFMG)

Essa figura mostra um carro que, fazendo uma curva, perde a calota da roda traseira direita. A figura indica essa situação, vista de cima, no instante em que a calota se desprende.

Desprezando-se a resistência do ar, pode-se afirmar que, imediatamente após a calota se soltar, ela se moverá, aproximadamente, em direção ao ponto

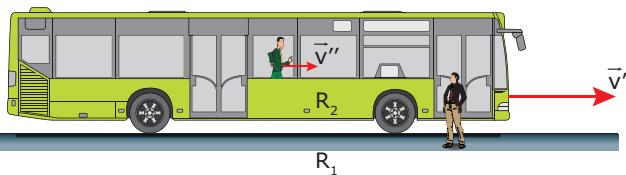
A) A.

B) B.

C) C.

D) D.

***Resolução*:**

Observe que o movimento do carro é um movimento curvilíneo, como aquele mostrado na figura do esmeril. O vetor velocidade do carro é corretamente representado por um vetor que seja tangente à trajetória desse e no mesmo sentido de seu movimento, conforme ilustra a figura a seguir:

Estando a calota, inicialmente, presa ao carro, temos que o vetor velocidade dela será idêntico ao vetor velocidade do carro, até o momento em que essa se desprenda do carro. Logo, quando a calota se desprender, seu vetor velocidade estará orientado na direção mostrada na figura anterior. Assim, a calota se moverá em direção ao ponto A.

MUDANÇAS DE REFERENCIAL

Durante um longo tempo da história da humanidade, pensou-se que a Terra fosse o centro do Universo. Era natural tomá-la como referência para classificar os objetos como estando em movimento ou em repouso. Hoje sabemos que a Terra gira ao redor do Sol e que este, por sua vez, arrasta todos os planetas do sistema solar em seu movimento ao redor do centro de nossa galáxia. A nossa galáxia, a Via-Láctea, por sua vez, está em movimento em relação a outras galáxias. Enfim, não existe um local, um sistema de referência absoluto, como imaginaram Newton e outros cientistas. No entanto, como usualmente trabalhamos com situações que envolvem pequenos intervalos de tempo (segundos, dias, meses), podemos considerar as estrelas como um sistema de referência inercial.

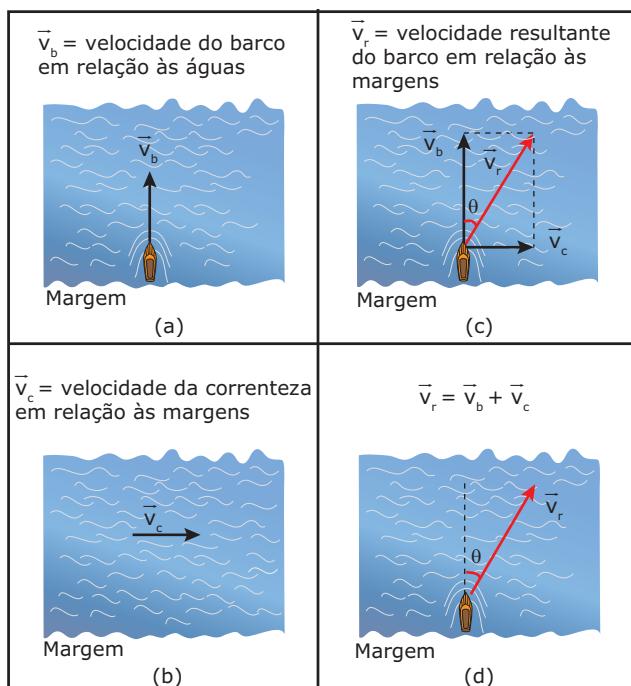
Ao mudarmos de um sistema de referência para outro, devemos tomar alguns cuidados para que não incorramos em erros. Faremos uma descrição simplificada de alguns aspectos dessa mudança, utilizando situações cotidianas: uma pessoa nas margens de um rio e outra pessoa dentro de um barco medindo a velocidade desse barco; uma pessoa no piso de um *shopping* e outra pessoa na escada rolante observando o deslocamento de uma terceira pessoa que sobe correndo a escada rolante; o piloto de um avião e a torre de comando comunicando-se em um voo, diante de uma forte corrente de ar, etc.

Situações envolvendo mudanças de referencial, de uma forma geral, podem ser descritas da seguinte maneira: Considere um sistema de referência R_1 e outro sistema de referência R_2, que se move com velocidade v′ em relação a R_1, e um corpo qualquer, que se desloca com velocidade v″ em relação ao referencial R_2. Qual será a velocidade v do corpo em relação a um observador que se encontra em R_1? A figura a seguir representa um exemplo de situações como essa.

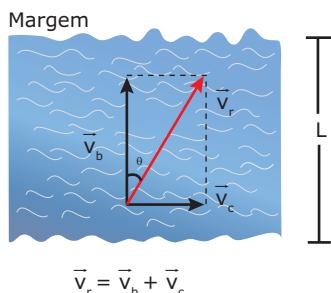
Nessa figura, o solo representa o referencial R_1, o ônibus representa o referencial R_2, e a pessoa dentro do ônibus é o corpo que se move em relação ao ônibus. A velocidade da pessoa em relação ao solo, $\vec{v}$, pode ser obtida por meio da soma vetorial do vetor velocidade da pessoa em relação ao ônibus, $\vec{v}''$, com o vetor velocidade do ônibus em relação ao solo, $\vec{v}'$. Como esses dois vetores velocidade estão na mesma direção e no mesmo sentido, o módulo dessa soma vetorial é igual à soma dos módulos dos vetores, ou seja:

$$|\vec{v}| = |\vec{v}''| + |\vec{v}'| \Rightarrow v = v'' + v'$$

As situações anteriormente descritas podem ser associadas ao desenho da seguinte maneira:

Observador (em R_1)	**R_2**	Objeto
Pessoa na margem de um rio	Rio com correnteza	Barco
Pessoa no solo	Corrente de ar	Avião
Pessoa no piso de um *shopping*	Escada rolante	Pessoa correndo na escada

No próximo tópico, apresentaremos alguns exemplos numéricos de situações que envolvem uma mudança de referencial.

COMPOSIÇÃO DE MOVIMENTOS

Existem várias situações cotidianas nas quais um objeto possui uma velocidade resultante, que é a soma vetorial de duas velocidades componentes, como um barco se movendo em um rio, uma pessoa se movendo no interior de um ônibus em movimento, uma pessoa caminhando em uma escada rolante, etc. Vejamos um exemplo numérico de um barco atravessando um rio.

O barco da figura a seguir, orientado perpendicularmente às margens de um rio, é impulsionado pelos motores, que imprimem ao barco uma velocidade v_b = 4 km/h (velocidade própria do barco). Simultaneamente, as águas arrastam o barco rio abaixo, com velocidade v_c = 3 km/h, em relação às margens (velocidade de arrastamento). O movimento do barco é resultado da superposição de dois movimentos independentes: um, na direção **perpendicular às margens** (direção de $\vec{v}_b$) e outro, na **direção da correnteza** (direção de $\vec{v}_c$).

Sendo o movimento do barco o resultado da combinação de dois movimentos retilíneos uniformes perpendiculares entre si, temos que a trajetória resultante é retilínea, já que não há aceleração atuando sobre o barco em nenhuma direção, e oblíqua em relação às velocidades componentes.

Embora o barco se oriente perpendicularmente às margens, a correnteza o arrasta rio abaixo, e a travessia se dará segundo a direção da velocidade resultante.

Como as velocidades $\vec{v}_b$ e $\vec{v}_c$ são perpendiculares entre si, o efeito da correnteza é unicamente deslocar (arrastar) o barco rio abaixo, não afetando o movimento na direção perpendicular à correnteza. De forma análoga, a velocidade de propulsão do barco não modifica o movimento deste rio abaixo (direção da correnteza).

$\vec{v}_r = \vec{v}_b + \vec{v}_c$

v_b: velocidade do barco em relação às águas (velocidade própria do barco), $v_b = 4$ km/h.

v_c: velocidade da correnteza em relação às margens (velocidade de arrastamento), $v_c = 3$ km/h.

v_r: velocidade resultante do barco em relação às margens, $v_r = 5$ km/h.

A velocidade resultante, $\vec{v}_r$, tem como componentes $\vec{v}_b$ e $\vec{v}_c$, perpendiculares entre si. Apenas a componente $\vec{v}_b$ afeta o tempo de travessia do rio. A componente $\vec{v}_c$ determina o deslocamento rio abaixo.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

04. Na situação representada na figura anterior, supondo a largura L do rio igual a 2,0 km, determinar

A) qual é o tempo de travessia do rio.

B) qual é o deslocamento do barco rio abaixo.

C) qual é a velocidade resultante do barco em relação às margens.

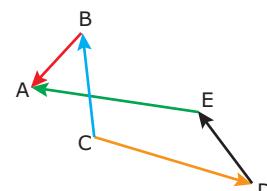
Resolução:

A) O tempo de travessia do rio é determinado apenas por $\vec{v}_b$, componente da velocidade do barco perpendicular às margens. Na direção perpendicular às margens, o barco percorrerá uma distância de 2,0 km a uma velocidade de 4 km/h. Assim:

$$v_b = \frac{L}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{L}{v_b} = \frac{2,0}{4} \therefore \Delta t = 0,5 \text{ h}$$

B) O deslocamento do barco rio abaixo é determinado por $\vec{v}_c$, componente da velocidade do barco paralela às margens. Lembre-se de que as duas velocidades atuam simultaneamente sobre o barco durante o tempo $\Delta t = 0,5$ h. Assim:

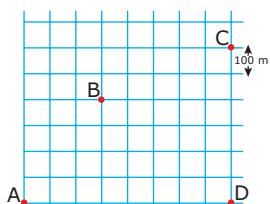
$$v_c = \frac{d}{\Delta t} \Rightarrow d = v_c.\Delta t = 3,0.0,5 \therefore d = 1,5 \text{ km}$$

C) A velocidade resultante do barco, em relação às margens, é determinada por meio da soma vetorial da velocidade do barco em relação à correnteza $\vec{v}_b$, com a velocidade da correnteza em relação à margem $\vec{v}_c$. Logo:

$$\vec{v}_r = \vec{v}_b + \vec{v}_c$$

$$v_r^2 = v_b^2 + v_c^2 = 4^2 + 3^2 = 25$$

$$v_r = \sqrt{25} \text{ km/h} = 5 \text{ km/h}$$

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

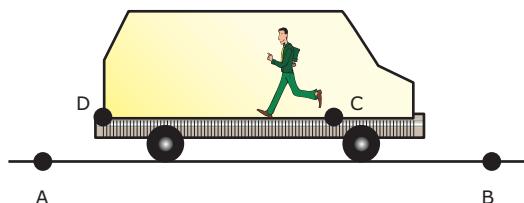
01. (UFC–2006) Analisando a disposição dos vetores BA, EA, CB, CD e DE, conforme figura a seguir, assinale a alternativa que contém a relação vetorial **CORRETA**.

A) CB + CD + DE = BA + EA

B) BA + EA + CB = DE + CD

C) EA – DE + CB = BA + CD

D) EA – CB + DE = BA – CD

E) BA – DE – CB = EA + CD

02. (UNITAU-SP) Uma grandeza física vetorial fica perfeitamente definida quando dela se conhecem

A) valor numérico, desvio e unidade.

B) valor numérico, desvio, unidade e sentido.

C) desvio, direção, sentido e unidade.

D) valor numérico, unidade, direção e sentido.

03. (UFC) A figura adiante mostra o mapa de uma cidade em que as ruas retilíneas se cruzam perpendicularmente, e cada quarteirão mede 100 m. Você caminha pelas ruas a partir de sua casa, na esquina A, até a casa de sua avó, na esquina B. Dali, segue até sua escola, situada na esquina C. A menor distância que você caminha e a distância em linha reta entre sua casa e a escola são, respectivamente,

A) 1 800 m e 1 400 m.

B) 1 600 m e 1 200 m.

C) 1 400 m e 1 000 m.

D) 1 200 m e 800 m.

E) 1 000 m e 600 m.

04. (Mackenzie-SP) Num mesmo plano vertical, perpendicular à rua, temos os segmentos de reta AB e CD, paralelos entre si. Um ônibus se desloca com velocidade constante de módulo v_1, em relação à rua, ao longo de $\overline{AB}$, no sentido de A para B, enquanto um passageiro se desloca no interior do ônibus, com velocidade constante de módulo v_2, em relação ao veículo, ao longo de $\overline{CD}$, no sentido de C para D. Sendo $v_1 > v_2$, o módulo da velocidade do passageiro em relação ao ponto B da rua é

A) $v_1 + v_2$.

B) $v_1 - v_2$.

C) $v_2 - v_1$.

D) v_1.

E) v_2.

05. (FEI-SP) Um barco movido por motor desce 120 km de um rio em 2 h. No sentido contrário, demora 3 h para chegar ao ponto de partida. Qual é a velocidade da água do rio? Sabe-se que, na ida e na volta, a potência desenvolvida pelo motor é a mesma.

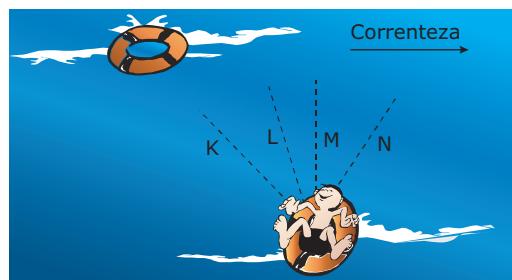
A) 15 km/h

B) 20 km/h

C) 30 km/h

D) 10 km/h

E) 48 km/h

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (UNESP-SP) Nas provas dos 200 m rasos, no atletismo, os atletas partem de marcas localizadas em posições diferentes na parte curva da pista e não podem sair de suas raias até a linha de chegada. Dessa forma, podemos afirmar que, durante a prova, para todos os atletas, o

A) espaço percorrido é o mesmo, mas o deslocamento e a velocidade vetorial média são diferentes.

B) espaço percorrido e o deslocamento são os mesmos, mas a velocidade vetorial média é diferente.

C) deslocamento é o mesmo, mas o espaço percorrido e a velocidade vetorial média são diferentes.

D) deslocamento e a velocidade vetorial média são iguais, mas o espaço percorrido é diferente.

E) espaço percorrido, o deslocamento e a velocidade vetorial média são iguais.

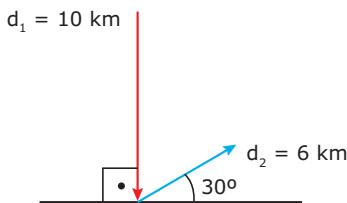
02. (UFJF-MG–2007) Um homem parado numa escada rolante leva 10 s para descê-la em sua totalidade. O mesmo homem leva 15 s para subir toda a escada rolante de volta, caminhando contra o movimento dela. Quanto tempo o homem levará para descer a mesma escada rolante, caminhando com a mesma velocidade com que subiu?

A) 5,00 s

B) 3,75 s

C) 10,00 s

D) 15,00 s

E) 7,50 s

03. (UFMG) Um menino flutua em uma boia que está se movimentando, levada pela correnteza de um rio. Uma outra boia, que flutua no mesmo rio a uma certa distância do menino, também está descendo com a correnteza. A posição das duas boias e o sentido da correnteza estão indicados nesta figura.

Considere que a velocidade da correnteza é a mesma em todos os pontos do rio. Nesse caso, para alcançar a segunda boia, o menino deve nadar na direção indicada pela linha

A) K.

B) L.

C) M.

D) N.

04. (UNESP-SP) Um caminhoneiro efetuou duas entregas de mercadorias e, para isso, seguiu o itinerário indicado pelos vetores deslocamento d_1 e d_2 ilustrados na figura.

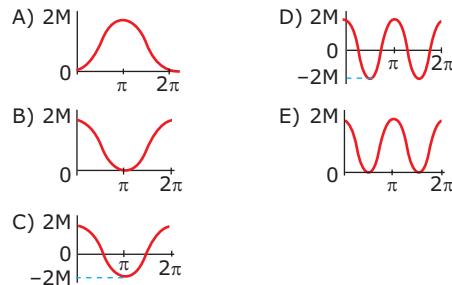
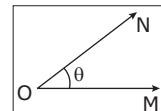
Para a primeira entrega, ele deslocou-se 10 km e para a segunda entrega, percorreu uma distância de 6 km. Ao final da segunda entrega, a distância a que o caminhoneiro se encontra do ponto de partida é

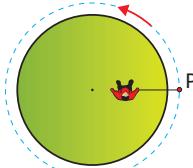
A) 4 km.
C) $2\sqrt{19}$ km.
E) 16 km.
B) 8 km.
D) $8\sqrt{3}$ km.

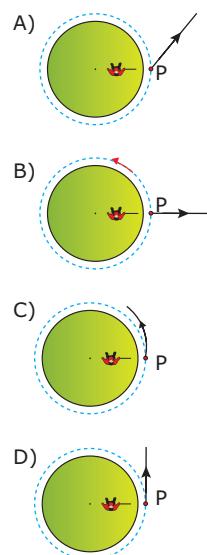
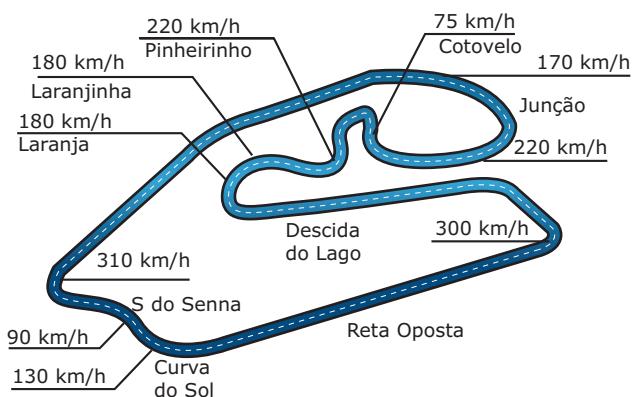
05. (PUC Minas) Você e um amigo resolvem ir ao último andar de um edifício. Vocês partem juntos do primeiro andar. Entretanto, você vai pelas escadas e seu amigo, pelo elevador. Depois de se encontrarem na porta do elevador, descem juntos pelo elevador até o primeiro andar. É **CORRETO** afirmar que

A) o seu deslocamento foi maior que o de seu amigo.
B) o deslocamento foi igual para você e seu amigo.
C) o deslocamento de seu amigo foi maior que o seu.
D) a distância que seu amigo percorreu foi maior que a sua.

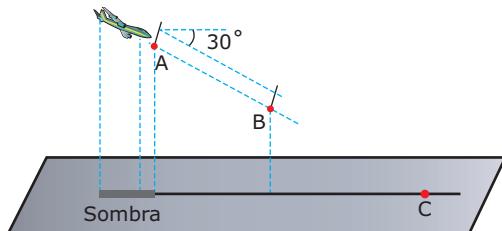
06. (PUC Rio) Um veleiro deixa o porto navegando 70 km em direção leste. Em seguida, para atingir seu destino, navega mais 100 km na direção nordeste. Desprezando a curvatura da Terra e admitindo que todos os deslocamentos são coplanares, determine o deslocamento total do veleiro em relação ao porto de origem.

(Considere $\sqrt{2}$ = 1,40 e $\sqrt{5}$ = 2,20)

A) 106 km
C) 154 km
E) 217 km
B) 34 km
D) 284 km

07. (UERJ–2010) Dois automóveis, M e N, inicialmente a 50 km de distância um do outro, deslocam-se com velocidades constantes na mesma direção e em sentidos opostos. O valor da velocidade de M, em relação a um ponto fixo da estrada, é igual a 60 km/h. Após 30 minutos, os automóveis cruzam uma mesma linha da estrada.

Em relação a um ponto fixo da estrada, a velocidade de N tem o seguinte valor, em quilômetros por hora:

A) 40 km/h
B) 50 km/h
C) 60 km/h
D) 70 km/h

08. (UFC) $\overline{M}$ e $\overline{N}$ são vetores de módulos iguais ($|\overline{M}| = |\overline{N}| = M$). O vetor $\overline{M}$ é fixo, e o vetor $\overline{N}$ pode girar em torno do ponto O (veja figura) no plano formado por $\overline{M}$ e $\overline{N}$. Sendo $\overline{R} = \overline{M} + \overline{N}$, indique, entre os gráficos a seguir, aquele que pode representar a variação de $|\overline{R}|$ como função do ângulo θ entre M e N.

09. (UFMG) Tomás está parado sobre a plataforma de um brinquedo, que gira com velocidade angular constante. Ele segura um barbante, que tem uma pedra presa na outra extremidade, como mostrado nesta figura:

Quando Tomás passa pelo ponto P, indicado na figura, a pedra se solta do barbante. Assinale a alternativa em que **MELHOR** se representa a trajetória descrita pela pedra, logo após se soltar, quando vista de cima.

10. (UERJ)

O GLOBO, 31 mar. 2002. (Adaptação).

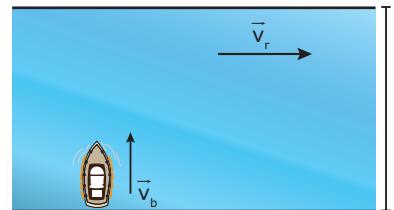
A velocidade vetorial média de um carro de Fórmula 1, em uma volta completa do circuito, corresponde a

A) 0.

B) 24.

C) 191.

D) 240.

11. (PUCPR) A figura representa um avião, que mergulha fazendo um ângulo de 30° com a horizontal, seguindo uma trajetória retilínea entre os pontos A e B. No solo, considerado como plano horizontal, está representada a sombra da aeronave, projetada verticalmente, e um ponto de referência C.

Considere as afirmativas que se referem ao movimento da aeronave no trecho AB e assinale a alternativa **CORRETA**.

A) A velocidade do avião em relação ao ponto C é maior que a velocidade de sua sombra, projetada no solo, em relação ao mesmo ponto.

B) A velocidade do avião é nula em relação à sua sombra projetada no solo.

C) A velocidade do avião em relação ao ponto C é igual à velocidade de sua sombra, projetada no solo em relação ao mesmo ponto.

D) A velocidade do avião em relação à sua sombra projetada no solo é maior que a velocidade de sua sombra em relação ao ponto C.

E) A velocidade da sombra em relação ao ponto C independe da velocidade do avião.

12. (PUC Rio–2006) Um avião em voo horizontal voa a favor do vento com velocidade de 180 km/h em relação ao solo. Na volta, ao voar contra o vento, o avião voa com velocidade de 150 km/h em relação ao solo. Sabendo-se que o vento e o módulo da velocidade do avião (em relação ao ar) permanecem constantes, o módulo da velocidade do avião e do vento durante o voo são, respectivamente,

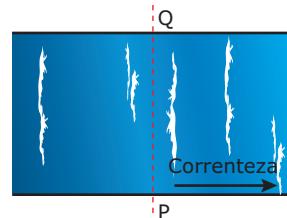
A) 165 km/h e 15 km/h.

B) 160 km/h e 20 km/h.

C) 155 km/h e 25 km/h.

D) 150 km/h e 30 km/h.

E) 145 km/h e 35 km/h.

13. (UFSM-RS) Um rio de largura ℓ é atravessado por um barco de maneira perpendicular à margem, com velocidade constante $\vec{v}_b$.

Considere:

$\vec{v}_r$ = velocidade da água do rio em relação às margens.

$\vec{v}_b$ = velocidade gerada pelo motor do barco em relação às margens do rio.

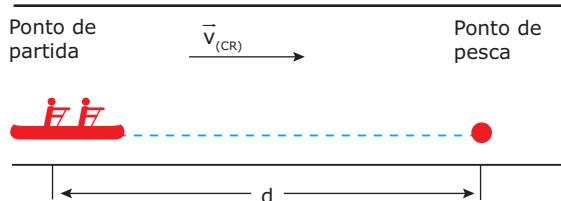
O tempo que o barco leva para atravessar o rio é

A) maior quando a velocidade $\vec{v}_r$ aumenta.

B) menor quando a velocidade $\vec{v}_r$ aumenta.

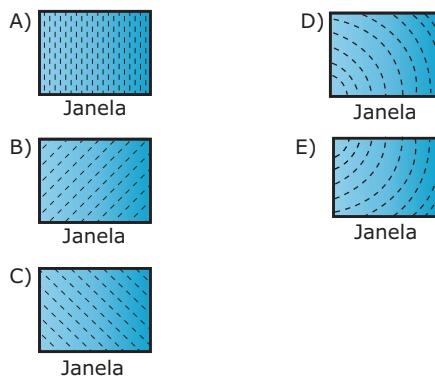
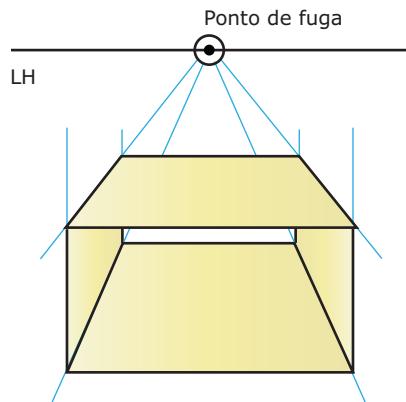
C) independente da velocidade $\vec{v}_r$.

D) maior quando a velocidade $\vec{v}_r$ diminui.

E) menor quando a velocidade $\vec{v}_r$ diminui.

14. (PUC-Campinas-SP) Um barco sai de um ponto P para atravessar um rio de 4,0 km de largura. A velocidade da correnteza, em relação às margens do rio, é de 6,0 km/h. A travessia é feita segundo a menor distância PQ, como mostra o esquema representado a seguir, e dura 30 minutos.

A velocidade do barco em relação à correnteza, em km/h, é de

A) 4,0. B) 6,0. C) 8,0. D) 10. E) 12.

15. (UFSC) Descendo um rio em sua canoa, sem remar, dois pescadores levam 300 segundos para atingir o seu ponto de pesca, na mesma margem do rio e em trajetória retilínea. Partindo da mesma posição e remando, sendo a velocidade da canoa, em relação ao rio, igual a 2,0 m/s, eles atingem o seu ponto de pesca em 100 segundos. Após a pescaria, remando contra a correnteza do rio, eles gastam 600 segundos para retornar ao ponto de partida.

Considerando que a velocidade da correnteza $v_{(CR)}$ é constante, assinale a(s) proposição(ões) **CORRETA(S)**.

01. Quando os pescadores remaram rio acima, a velocidade da canoa, em relação à margem, foi igual a 4,00 m/s.

02. Não é possível calcular a velocidade com que os pescadores retornaram ao ponto de partida, porque a velocidade da correnteza não é conhecida.

04. Quando os pescadores remaram rio acima, a velocidade da canoa, em relação ao rio, foi de 1,50 m/s.

08. A velocidade da correnteza do rio é 1,00 m/s.

16. Como a velocidade da canoa foi de 2,0 m/s, quando os pescadores remaram rio abaixo, então, a distância do ponto de partida ao ponto de pesca é 200 m.

32. Não é possível determinar a distância do ponto de partida até o ponto de pesca.

64. O ponto de pesca fica a 300 metros do ponto de partida.

Soma (   )

16. (Mackenzie-SP) Um passageiro em um trem, que se move para sua direita em movimento retilíneo e uniforme, observa a chuva através da janela. Não há ventos e as gotas de chuva já atingiram sua velocidade limite. O aspecto da chuva observado pelo passageiro é

17. (UEL-PR–2010) Observe as figuras a seguir:

Disponível em: <http://www.amopintar.com/perspectiva.com-um.ponto-de.fuga>. Acesso em: 20 ago. 2009.

Considere que você esteja assistindo a um filme no qual um caminhão percorre uma estrada, como a da foto, em direção ao ponto de fuga. Sabe-se que a traseira desse caminhão mede 2 m de largura. Fazendo uma análise quadro a quadro do filme, chega-se às seguintes conclusões:

- Uma boa aproximação para o ângulo formado pelas linhas que partem dos extremos superiores da traseira do caminhão até o ponto de fuga é de 5,2º.
- Após um segundo de movimento, o tamanho aparente da traseira do caminhão reduziu-se à metade.

Sabendo que tg (2,6°)≈0,045, a velocidade média do caminhão, nesse intervalo de tempo, é de, aproximadamente,

A) 12 km/h.

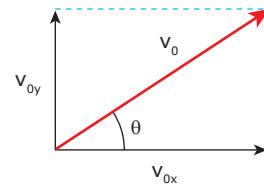
B) 25 km/h.

C) 40 km/h.

D) 59 km/h.

E) 80 km/h.

SEÇÃO ENEM

01. A figura a seguir foi retirada de uma página da Internet relacionada ao estudo de conceitos de Física.

Pode-se associar a figura com o seguinte tema:

A) Deslocamentos sucessivos

B) Intervalos de tempo

C) Somatório de volumes

D) Velocidade relativa de veículos

E) Somatório de massas

02. A utilização dos rios como via de transporte / navegação sempre foi presente na história da humanidade. No Brasil, o transporte fluvial é muito utilizado na região Norte devido ao elevado número de rios e devido à escassez de rodovias. Uma característica positiva desse meio de transporte é o baixo custo e o baixo impacto ambiental. Um dos principais problemas desse tipo de transporte está ligado à irregularidade da superfície (topografia), que deve ser plana, além de levar em conta aspectos de caráter natural, como os períodos de cheias e de vazantes dos rios, ambas relacionadas ao volume de água que sofrem variações e que interferem na navegação. Assim como as estradas, os rios apresentam suas regras de tráfego para os barcos. Barcos que descem o rio o fazem movimentando-se sempre no meio do rio, enquanto que os barcos que sobem o rio o fazem trafegando sempre próximo às margens. A característica dos rios que melhor explica as regras do tráfego descritas é

A) a diferença do nível de água do rio entre o período de cheias e o período de seca.

B) a menor velocidade da água do rio próximo à margem em comparação à posição central.

C) o desgaste desigual das margens direita e esquerda dos rios devido à rotação da Terra.

D) o desnível das diferentes partes do rio no seu curso superior, intermediário e inferior.

E) o fato de os rios apresentarem maior profundidade do seu leito na parte central que nas margens.

03. Durante uma aula de Educação Física, uma bola é chutada obliquamente em relação ao solo. Uma estudante representa vetorialmente a velocidade inicial (v_0) da bola e suas componentes ortogonais. A representação feita por ela é mostrada na figura a seguir.

Ela distribui seu diagrama a 5 colegas de grupo e cada uma das colegas elabora um comentário sobre o esquema.

Carolina: Os módulos dos vetores v_{0x} e v_{0y} podem se tornar maiores que o módulo do vetor v_0, caso o valor de θ varie.

Marina: A soma dos módulos dos vetores v_{0x} e v_{0y} sempre será igual ao valor do módulo do vetor v_0.

Fernanda: O vetor v_{0y} pode ser obtido por meio da soma vetorial do vetor v_0 com o vetor v_{0x}.

Isabela: Apesar de o diagrama mostrar três vetores, os vetores v_0, v_{0x} e v_{0y} não possuem existência concomitante.

Larissa: Esse diagrama não poderia ser utilizado para representar outras grandezas vetoriais.

O comentário correto foi feito pela estudante

A) Carolina.

B) Marina.

C) Fernanda.

D) Isabela.

E) Larissa.

GABARITO

Fixação

01. D
02. D
03. C
04. B
05. D

Propostos

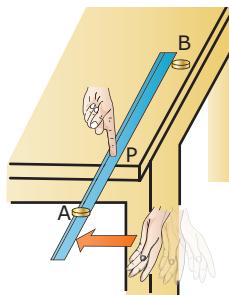
01. A
02. B
03. A
04. C
05. B
06. C
07. A
08. B
09. D
10. A
11. A
12. A
13. C
14. D
15. Soma = 76
16. B
17. C

Seção Enem

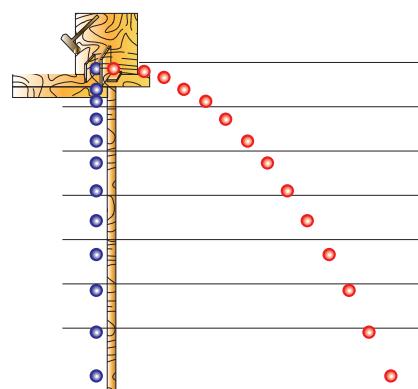
01. A
02. B
03. D

FÍSICA

MÓDULO 04 FRENTE A

Lançamento horizontal e lançamento oblíquo

Desde o momento no qual nossos ancestrais primitivos lançaram a primeira pedra contra algum animal que os ameaçava, o ser humano se preocupou em compreender o movimento dos objetos por ele lançados: pedras, flechas, lanças, posteriormente, balas de canhão e mísseis. Filósofos debateram sobre o assunto e várias explicações surgiram para responder às perguntas: por que os objetos caem? Como caem? O que determina o tempo de queda de um objeto? Como devo lançar um objeto para que ele possa ir o mais longe possível? Neste módulo, no entanto, uma discussão histórica sobre o lançamento de projéteis não será feita. Estudaremos o lançamento de projéteis do ponto de vista físico e matemático, o que será útil para a resolução de vários problemas.

PRINCÍPIO DA INDEPENDÊNCIA

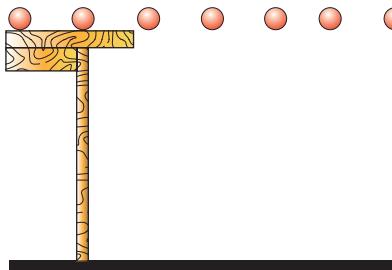
Iniciaremos o módulo com uma atividade simples de ser realizada, em casa ou na sala de aula. Nessa atividade, utilizaremos duas moedas, uma apoiada sobre uma mesa horizontal e outra apoiada sobre uma régua, estando as duas moedas, inicialmente, à mesma altura em relação ao solo. A partir da configuração inicial, mostrada na figura a seguir, as moedas são colocadas em movimento em um mesmo instante. Uma delas (moeda A) é simplesmente abandonada, caindo verticalmente para baixo, em direção ao solo, e a outra (moeda B) é lançada horizontalmente, caindo a certa distância do pé da mesa. A figura mostra como a situação deve ser conduzida para que as duas moedas iniciem o movimento no mesmo instante. Bata na régua, na direção indicada pela seta, próximo ao ponto onde se encontra a moeda A. A régua tende a girar, fazendo com que a moeda A caia, a partir do repouso, em movimento vertical, e que a moeda B seja lançada horizontalmente, descrevendo uma trajetória parabólica.

A altura inicial das moedas é a mesma, e o momento em que elas iniciam o movimento também é o mesmo, mas qual moeda chegará primeiro ao solo? Pense um pouco antes de realizar a atividade.

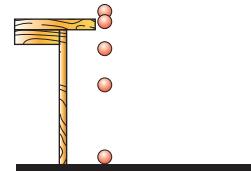
O som emitido pelas moedas ao tocarem o chão poderá lhe fornecer uma pista para o que acontece: se o barulho for único, as duas moedas chegaram ao solo no mesmo instante, caso contrário, elas chegaram ao solo em momentos distintos.

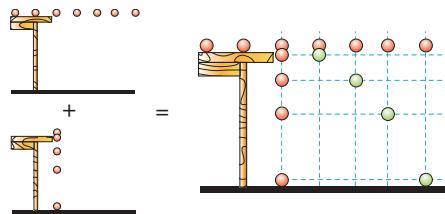
Essa experiência, apesar de simples, fornece indícios para um importante enunciado feito por Galileu Galilei, denominado de **princípio da independência dos movimentos**, que afirma que dois movimentos perpendiculares entre si ocorrem de forma independente um do outro. Uma aplicação desse princípio já foi verificada quando observamos que o intervalo de tempo gasto para um barco atravessar um rio não depende da velocidade da correnteza, mas apenas da componente da velocidade do barco perpendicular à margem do rio. Esse fato pode ser explicado pelo princípio da independência dos movimentos, tendo em vista que a componente da velocidade do barco perpendicular às margens é também perpendicular à velocidade da correnteza. Logo, o movimento do barco rio abaixo é independente do movimento na direção perpendicular à margem, que é o movimento que determinará o tempo de travessia do barco.

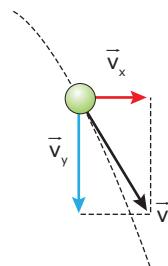
O mesmo princípio pode ser aplicado a uma situação análoga: a queda de duas esferas, uma solta na direção vertical e outra lançada horizontalmente, semelhantemente às moedas da atividade proposta no início deste módulo. A figura seguinte ilustra essa situação. A figura mostra a trajetória descrita pelas duas esferas, uma solta em queda livre e a outra lançada horizontalmente.

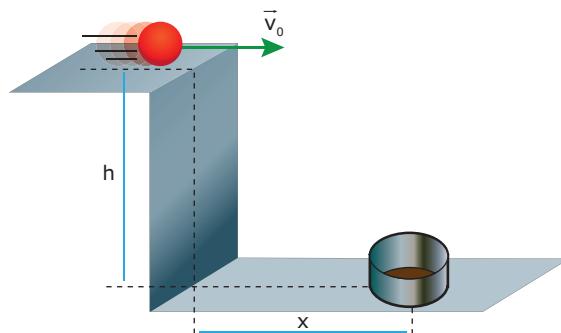
Observação: No estudo que faremos, não consideraremos os efeitos da resistência do ar.

A imagem anterior nos permite concluir que

1. o intervalo de tempo de queda é o mesmo para as duas esferas;
2. ambos os movimentos são acelerados, possuindo o mesmo vetor aceleração (mesmo módulo, direção e sentido);
3. uma trajetória é retilínea, enquanto a outra é parabólica.

Diante das observações anteriores, surgem os seguintes questionamentos:

- Por que o intervalo de tempo de queda é o mesmo? Como Galileu argumentou, o tempo de queda depende somente do movimento das esferas na direção vertical. As duas esferas apresentavam a mesma velocidade inicial na direção vertical, quando o movimento iniciou, $v_{0_y} = 0$. Portanto, como as esferas iniciam o movimento à mesma altura, no mesmo instante, no mesmo local (ou seja, submetidas ao mesmo vetor aceleração) e com a mesma velocidade inicial na direção vertical, elas devem cair ao mesmo tempo.
- Por que ambos os movimentos são acelerados? Ambas as esferas estão sujeitas à gravidade e, ao desprezarmos a influência da resistência do ar, observamos que o valor da velocidade vertical das esferas aumenta continuamente, já que a distância vertical percorrida em um mesmo intervalo de tempo é crescente. Além disso, o espaço vertical percorrido por ambas as esferas é sempre o mesmo em qualquer intervalo de tempo. Consequentemente, os valores das suas velocidades são sempre iguais e, portanto, pode-se concluir que a aceleração é a mesma para as duas esferas.
- Por que uma trajetória é retilínea, e a outra, parabólica? Para responder a essa questão, temos de decompor o movimento da esfera que foi lançada horizontalmente.

Decomposição do movimento

Sabemos que, para alterar a velocidade de um objeto, é necessária a ação de uma aceleração. Esse é um dos fundamentos das Leis de Newton que estudaremos posteriormente. Portanto, somente a ação de uma força pode alterar o módulo ou a direção da velocidade de um objeto. Se não houvesse gravidade ou resistência do ar, uma esfera que rolasse sobre uma mesa e a abandonasse continuaria a se mover com velocidade constante, percorrendo distâncias iguais em intervalos de tempos iguais, apresentando um movimento retilíneo uniforme.

Se uma esfera é simplesmente solta, a partir de uma certa altura, seu movimento é um movimento de queda livre, como mostrado na figura a seguir. Esse movimento é um movimento acelerado, o que indica que a distância percorrida, em intervalos de tempo iguais, aumenta cada vez mais.

A trajetória parabólica descrita pela esfera, quando esta é lançada horizontalmente, é resultado da combinação do movimento horizontal (uniforme) com o movimento vertical (acelerado). Cada um dos movimentos é independente do outro, e seus efeitos, combinados, produzem a trajetória parabólica da esfera.

As equações e as características vetoriais para os movimentos mencionados já foram estudadas em módulos anteriores, devendo ser, agora, aplicadas conjuntamente. Na direção horizontal, como o movimento é uniforme, o vetor velocidade permanece constante em módulo, direção e sentido. Na direção vertical, como o movimento é uniformemente acelerado, o vetor velocidade possui direção vertical, sentido para baixo e módulo crescente, de acordo com as equações já estudadas. O quadro a seguir apresenta o vetor velocidade para cada um dos movimentos componentes do movimento da esfera e as características associadas a eles.

Direção horizontal	Direção vertical
Movimento uniforme	Movimento uniformemente acelerado
$d_x = vt$	$d_y = v_0t + ½(at^2)$
v_x = constante	$v_y = v_0 + at$
$a_x = 0$	$a_y = 9{,}8\ m/s^2$
$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y$ e $v^2 = v^2_x + v^2_y$	

É importante observar que o vetor velocidade $\vec{v}$ de um corpo é sempre tangente à trajetória deste, em qualquer posição.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. (PUC Minas) A figura a seguir mostra uma esfera lançada com velocidade horizontal de 5,0 m/s de uma plataforma de altura h = 1,8 m.

Ela deve cair dentro do pequeno frasco colocado a uma distância x do pé da plataforma. A distância x deve ser de, aproximadamente,

A) 1,0 m.

B) 2,0 m.

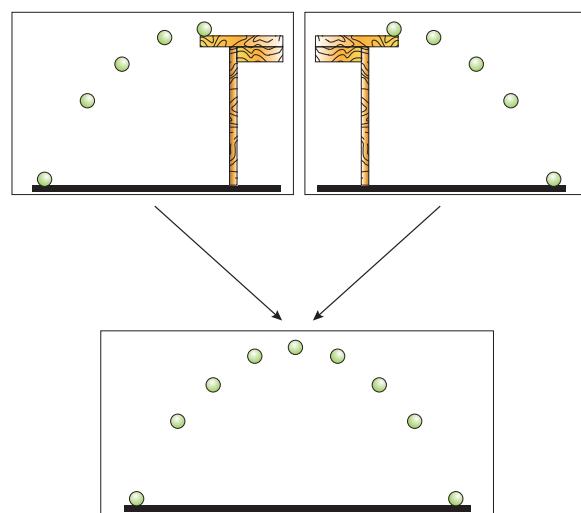
C) 2,5 m.

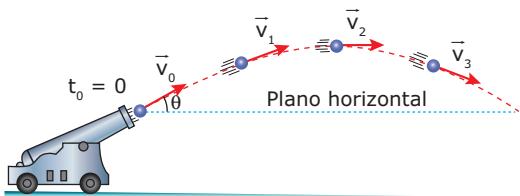
D) 3,0 m.

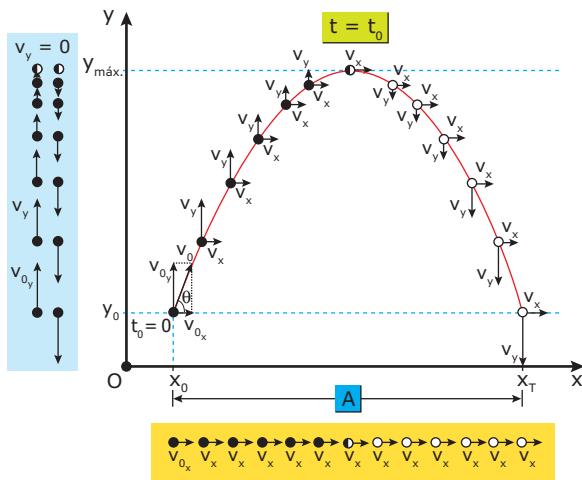
E) 3,5 m.

Resolução:

O intervalo de tempo de queda da esfera, desde o instante em que ela abandona a plataforma até o instante em que ela cai dentro do pote, em uma trajetória parabólica, será igual ao intervalo de tempo que a esfera gastaria para chegar ao solo em um movimento vertical, em queda livre, de uma altura de 1,8 m. Utilizando a equação da Cinemática $d = v_0t + ½(at^2)$, para essa situação, encontraremos um intervalo de tempo de queda igual a 0,6 s. Como na direção horizontal o movimento da esfera é uniforme, a distância horizontal percorrida por ela, no intervalo de tempo adequado, é dada por:

$d_H = v_Ht = 5{,}0.0{,}6 = 3{,}0$ m

Lançamento oblíquo

Em toda prova de arremesso, seja ela de dardo, de disco, de martelo ou de peso, os competidores sempre procuram arremessar os objetos quando estes formam um ângulo de 45º com a horizontal. É para esse valor de ângulo que um corpo arremessado percorre a maior distância horizontal, comparativamente a corpos arremessados com velocidades de mesmo módulo.

Escuela Virtual de Deportes / Creative Commons

O lançamento oblíquo nada mais é do que uma extensão do lançamento horizontal estudado no tópico anterior. Nessa nova situação, o lançamento é feito com velocidade vertical inicial diferente de zero. Dessa forma, devemos analisar o movimento vertical na subida e na descida, mas isso não representará grande dificuldade, já que a descrição física e matemática dos movimentos verticais de subida e descida são análogas.

Imagine uma bala de canhão lançada obliquamente com uma velocidade inicial $\vec{v}_0$, inclinada de um ângulo θ em relação à horizontal.

O vetor velocidade de um corpo em trajetória curvilínea é tangente à trajetória deste em qualquer instante, tendo o mesmo sentido do movimento. Observe que a velocidade no ponto mais alto atingido pelo projétil é horizontal e não nula. Enquanto o projétil sobe, seu movimento é desacelerado e, ao descer, acelerado. Neste módulo, iremos considerar que os efeitos da resistência do ar sobre o movimento do projétil sejam desprezíveis.

A figura a seguir mostra as características do vetor velocidade nas direções vertical e horizontal durante todo o movimento. É importante notar que o movimento segundo o eixo Oy equivale a um lançamento vertical para cima, com velocidade inicial v_{0_y} e aceleração de valor −10 m/s². Como já dito, enquanto o projétil sobe, seu movimento é desacelerado e, ao descer, acelerado.

Vamos apresentar separadamente as características de cada parte do movimento e suas respectivas equações, considerando como positivos os sentidos coincidentes com os sentidos dos eixos coordenados:

Durante a subida:

- a componente vertical da velocidade é positiva;
- o módulo da componente vertical da velocidade diminui (movimento uniformemente desacelerado);
- o módulo da velocidade horizontal não se altera;
- o valor da aceleração devido à gravidade é de – 9,8 m/s²;
- $v = v_0 + gt$ // $h = v_0t + ½(gt^2)$ // $v^2 = v_0^2 + 2gd$;
- analisando-se o movimento total de subida, o valor da velocidade vertical inicial, v_{0_y}, é o valor da componente vertical da velocidade de lançamento ($v_{0_y} = v_0.\text{sen } \theta$), e a velocidade final é zero.

No ponto mais alto da trajetória:

- o valor da componente vertical da velocidade é nulo;
- o intervalo de tempo gasto no movimento de subida será igual ao intervalo de tempo gasto no movimento de descida;
- o valor da altura máxima atingida pelo projétil pode ser determinado a partir da análise do movimento uniformemente desacelerado, na direção vertical;
- o valor da distância horizontal percorrida pode ser determinado a partir da análise do movimento uniforme, na direção horizontal, utilizando-se a velocidade horizontal inicial e o intervalo de tempo gasto na subida.

Durante a descida:

- a componente vertical da velocidade é negativa;
- o módulo da velocidade vertical aumenta (movimento uniformemente acelerado);
- o valor da componente horizontal da velocidade permanece constante e igual ao valor da componente horizontal da velocidade no momento do lançamento;
- o valor da aceleração devido à gravidade é de −9,8 m/s²;
- $v = v_0 + gt$ // $d = v_0t + (½)gt^2$ // $v^2 = v_0^2 + 2gd$;
- analisando-se o movimento de descida, o valor da velocidade vertical inicial v_0 é zero, e o valor da velocidade final possui o mesmo módulo da componente vertical da velocidade de lançamento ($v_{0_y} = v_0.\text{sen } \theta$), porém, com sinal negativo.

Tempo total de movimento

Podemos determinar o tempo total de permanência do projétil no ar, realizando os cálculos do tempo de subida e de descida separadamente, ou então, efetuar os cálculos considerando a velocidade inicial de subida e a velocidade final de descida.

O tempo de subida pode ser determinado, utilizando-se a equação $v_y = v_{0_y} + gt$. No instante em que o projétil atinge o ponto mais alto da trajetória, $v_y = 0$. Logo:

$$0 = v_{0_y} + gt_{subida} \Rightarrow t_{subida} = \frac{-v_{0_y}}{g} = \frac{-v_0.\text{sen } \theta}{g}$$

Como o intervalo de tempo de subida é igual ao de descida, considerando que o ponto de lançamento esteja nivelado com o solo, temos:

$$t_{descida} = \frac{-v_0.\text{sen } \theta}{g}$$

Desse modo, o intervalo de tempo total de permanência do projétil no ar será dado por:

$$t_{total} = \left(\frac{-2v_0.\text{sen }\theta}{g}\right)$$

Observação: Apesar do sinal negativo antes da expressão que determina o tempo total do movimento, este obviamente não é negativo, já que, por causa do eixo de referência usado, o valor de g também é negativo. Essa observação vale para as equações posteriores que apresentarem o mesmo fenômeno.

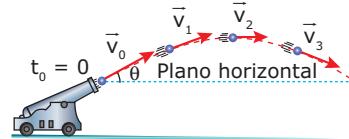
Altura máxima ($h_{MÁX.}$)

O valor da altura máxima ($h_{MÁX.}$) atingida pelo projétil, em relação ao solo, pode ser determinado, lembrando-se que $h_{MÁX.}$ é o valor da altura vertical quando $\vec{v}_y$ se anula. Na direção vertical, durante a subida, o movimento é uniformemente desacelerado. Utilizando a equação de Torricelli:

$$v_y^2 = v_{0y}^2 + 2gh_{MÁX.} \Rightarrow 0^2 = v_{0_y}^2 + 2gh_{MÁX.} \Rightarrow h_{MÁX.} = \frac{-v_{0_y}^2}{2g}$$

$$\Rightarrow h_{MÁX.} = \frac{-v_0^2.\text{sen}^2\,\theta}{2g}$$

Alcance horizontal

O alcance horizontal (A) é a distância percorrida pelo projétil, na horizontal, desde o instante do lançamento até o momento em que o projétil toca o solo. Seu valor é igual ao deslocamento horizontal do projétil durante o intervalo de tempo total do movimento. Como o movimento é uniforme, podemos escrever que:

$$d_H = vt \Rightarrow A = v_{0_x}t = v_0.\cos\theta\left(\frac{-2v_0.\text{sen }\theta}{g}\right) = -2v_0^2\frac{\text{sen}\,\theta.\cos\theta}{g}$$

Como $2\text{sen }\theta.\cos\theta = \text{sen }(2\theta) \Rightarrow A = \frac{-v_0^2}{g}\text{sen }(2\theta)$.

Observe que a equação anterior nos permite determinar qual deve ser o ângulo de lançamento para que o alcance horizontal seja máximo. Devemos procurar um ângulo no qual o valor de sen (2θ) seja o maior possível. A imagem da função seno varia de −1 a +1, sendo que entre 0 e π, apenas sen 90º = +1. Desse modo, podemos concluir que o valor de θ para que o alcance do projétil seja máximo deve ser igual a 45º. Por esse motivo, no início do módulo, dissemos que os atletas de arremesso de dardo (ou outro objeto qualquer) procuram lançar os dardos com um ângulo igual a 45º em relação à direção horizontal.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

02. Uma bala de canhão é lançada obliquamente com velocidade v_0, de módulo 50 m/s, sob um ângulo de lançamento θ, (sen θ = 0,6 e cos θ = 0,8), conforme a figura a seguir:

Calcular, considerando g = 10 m/s², e desprezando a influência do ar,

A) o valor da velocidade no ponto mais alto da trajetória.

B) o intervalo de tempo total do movimento.

C) o valor da altura máxima.

D) o alcance horizontal.

Resolução:

A) O valor da velocidade no ponto mais alto da trajetória é igual ao valor da componente da velocidade na direção do eixo horizontal, já que a componente vertical da velocidade é nula. O módulo da componente horizontal da velocidade, que permanece constante durante todo o movimento, pode ser encontrado por meio da seguinte relação: $v_x = v_0.\cos\theta = 50.0,8 = 40$ m/s.

B) Considerando que a distância vertical percorrida no movimento de subida seja igual à distância vertical percorrida no movimento de descida, temos que o intervalo de tempo de subida é igual ao intervalo de tempo de descida. Podemos calcular o intervalo de tempo por meio dos seguintes processos:

b1. Calculando o intervalo de tempo total do movimento de subida.

$v_{0y} = v_0.\text{sen }\theta$

$v_{0y} = 50.0,6 = 30$ m/s

Substituindo os valores, teremos:

$v = v_0 + gt \Rightarrow 0 = 30 - 10t_s \Rightarrow t_s = 3$ s

Sendo o tempo de subida igual ao tempo de descida, temos que o tempo total de movimento é 6,0 s.

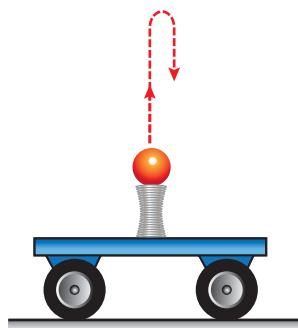
b2. Calculando o intervalo de tempo total.

Se considerarmos o movimento na vertical durante todo o movimento, temos que a componente vertical inicial da velocidade da bola de canhão é de +30 m/s, e a componente final será de −30 m/s. Logo, o intervalo de tempo total do movimento é dado por:

$v = v_0 + gt \Rightarrow -30 = +30 + (-10)t \Rightarrow t = 6$ s

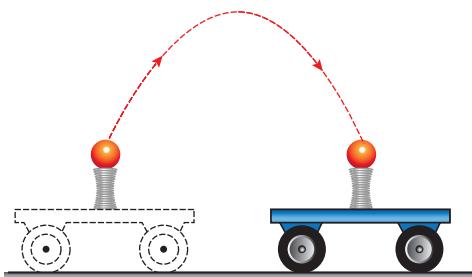
(3 s para a subida e 3 s para a descida).

C) Para calcularmos o valor da altura máxima alcançada pela bola, podemos trabalhar com a equação de Torricelli: $v^2 = v_0^2 + 2gh$.

Substituindo as variáveis pelos valores conhecidos, teremos:

$0^2 = 30^2 + 2(-10)h \Rightarrow h = 45$ m

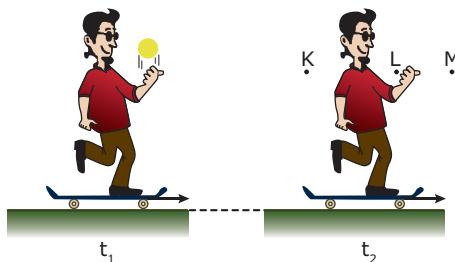
D) Como o objeto se deslocou durante 6 s com uma velocidade horizontal de 40 m/s ($v_x = v_0.\cos\theta = 40$m/s), temos que seu alcance é de:

$d_x = v_x t$

$d_x = 40$ m/s.6 s = 240 m

03. Um interessante brinquedo científico consiste em um carrinho que contém uma mola posicionada na direção vertical, como mostra a figura a seguir. Uma esfera de metal é colocada sobre a mola, e esta a lança verticalmente para cima. A esfera retorna ao ponto de lançamento após alguns instantes.

O que acontece com a esfera de aço, caso ela seja lançada enquanto o carrinho estiver em movimento retilíneo e uniforme? A esfera cairá atrás, na frente ou sobre a mola?

Resolução:

Se desprezarmos a resistência do ar, podemos considerar o movimento da esfera, na direção horizontal, como sendo retilíneo e uniforme, com a mesma velocidade do carrinho que a lançou. Portanto, em relação ao carrinho, a esfera encontra-se em repouso na direção horizontal e executa um MRUV na direção vertical. Assim, ela retorna ao mesmo ponto do carrinho em que foi lançada, ou seja, sobre a mola.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (PUC Minas–2009) Um arqueiro atira uma flecha, que percorre uma trajetória parabólica vertical até atingir o alvo. No ponto mais alto da trajetória da flecha,

A) a velocidade e a aceleração são nulas.

B) a aceleração é nula.

C) o vetor velocidade e o vetor aceleração são horizontais.

D) a componente vertical da velocidade é nula.

02. (UFMG) Observe a figura.

Daniel está andando de *skate* em uma pista horizontal. No instante t_1, ele lança uma bola, que, do seu ponto de vista, sobe verticalmente. A bola sobe alguns metros e cai, enquanto Daniel continua a se mover em trajetória retilínea, com velocidade constante. No instante t_2, a bola retorna à mesma altura em que foi lançada.

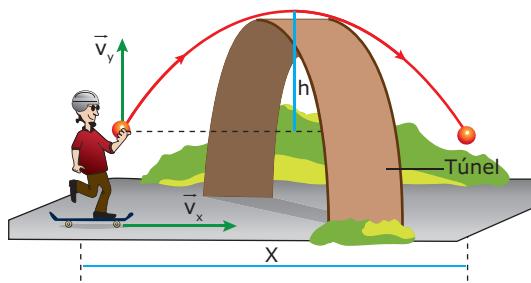
Despreze os efeitos da resistência do ar.

Assim, no instante t_2, o ponto em que a bola estará, mais provavelmente, é

A) K.

B) L.

C) M.

D) qualquer um, dependendo do módulo da velocidade de lançamento.

03. (UFV-MG–2008) A figura a seguir ilustra o movimento de um projétil após ser lançado com velocidade de módulo v_0 e com um ângulo θ relativo à horizontal definida pela superfície da Terra. Desprezando os efeitos de resistência do ar e considerando $0° < \theta < 90°$, é **CORRETO** afirmar que

A) a altura máxima atingida pelo projétil é independente do ângulo de lançamento θ.

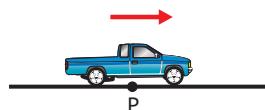
B) a velocidade do projétil é nula no ponto mais alto da trajetória.

C) o alcance horizontal máximo é independente do ângulo de lançamento θ.

D) a aceleração resultante do projétil é constante ao longo da trajetória.

04. (CEFET-MG–2006) Um aluno do CEFET, em uma partida de futebol, lança uma bola para cima, numa direção que forma um ângulo de 60° com a horizontal. Sabendo que a velocidade na altura máxima é 20 m/s, podemos afirmar que a velocidade de lançamento da bola, em m/s, foi de

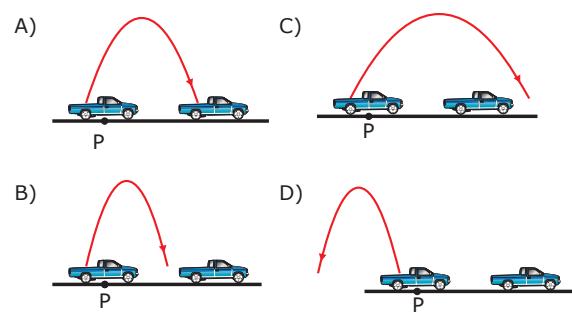
A) 10.
B) 17.
C) 20.
D) 30.
E) 40.

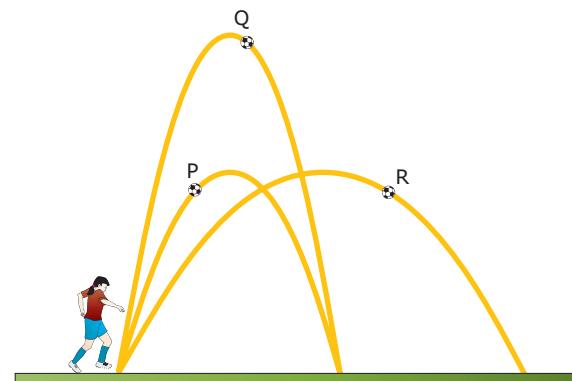
05. (UECE) Uma bola é lançada verticalmente para cima, com velocidade de 18 m/s, por um rapaz situado em um *skate* que avança segundo uma reta horizontal, a 5,0 m/s. Depois de atravessar um pequeno túnel, o rapaz volta a recolher a bola, a qual acaba de descrever uma parábola, conforme a figura.

Despreze a resistência do ar e considere g = 10 m/s².

A altura máxima h alcançada pela bola e o deslocamento horizontal x do *skate* valem, respectivamente,

A) h = 16,2 m; x = 18,0 m.
B) h = 16,2 m; x = 9,0 m.
C) h = 8,1 m; x = 9,0 m.
D) h = 10,0 m; x = 18,0 m.

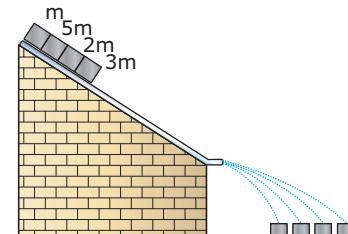
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (UFMG–2007) Uma caminhonete move-se, com aceleração constante, ao longo de uma estrada plana e reta, como representado na figura:

A seta indica o sentido da velocidade e o da aceleração dessa caminhonete.

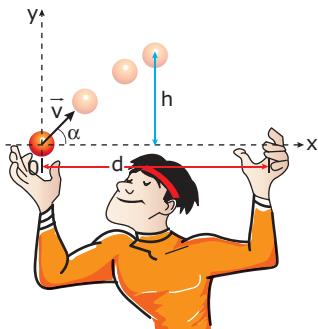
Ao passar pelo ponto P, indicado na figura, um passageiro, na carroceria do veículo, lança uma bola para cima, verticalmente em relação a ele.

Despreze a resistência do ar.

Considere que, nas alternativas a seguir, a caminhonete está representada em dois instantes consecutivos.

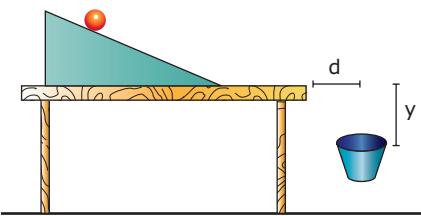
Assinale a alternativa em que está **MELHOR** representada a trajetória da bola vista por uma pessoa, parada, no acostamento da estrada.

02. (UFMG–2006) Clarissa chuta, em sequência, três bolas – P, Q e R –, cujas trajetórias estão representadas nesta figura:

Sejam t_P, t_Q e t_R os tempos gastos, respectivamente, pelas bolas P, Q e R, desde o momento do chute até o instante em que atingem o solo.

Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que

A) $t_Q > t_P = t_R$.
B) $t_R > t_Q = t_P$.
C) $t_Q > t_R > t_P$.
D) $t_R > t_Q > t_P$.

03. (UFG) Os quatro blocos, representados na figura com suas respectivas massas, são abandonados em um plano inclinado que não apresenta atrito e termina voltado para a direção horizontal.

Os blocos, ao deixarem a plataforma, descrevem trajetórias parabólicas em queda livre e alcançam o solo, formando, da esquerda para a direita, a sequência

A) m; 5m; 2m; 3m.
B) m; 2m; 3m; 5m.
C) 3m; 2m; 5m; m.
D) 3m; 5m; m; 2m.
E) 5m; 3m; 2m; m.

04. (CEFET-MG–2009) Um malabarista lança uma de suas bolinhas com velocidade inicial v = 3 m/s com ângulo $\alpha = 45°$ em relação à horizontal, conforme representado a seguir.

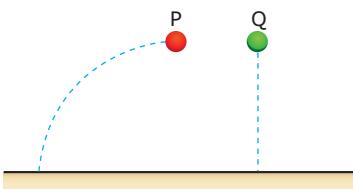
Desprezando a resistência do ar, é **CORRETO** afirmar que a(o)

A) altura máxima h é 45 cm.

B) alcance horizontal máximo d é 90 cm.

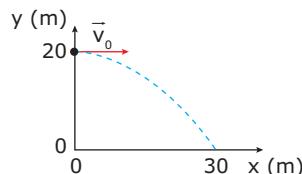
C) energia cinética da bolinha, no ponto h, é máxima.

D) tempo para atingir a altura máxima h é igual a 0,6 s.

E) energia mecânica da bolinha, ao atingir a outra mão do malabarista, é nula.

05. (OBF) Uma bola é solta a partir do repouso, sempre da mesma posição, no plano inclinado mostrado na figura a seguir. A bola rola sobre o plano e sobre a mesa, caindo livremente, e um estudante, com uma cesta, a recolhe sem deixá-la cair no chão. Em determinado instante, ele posiciona a cesta como indica o desenho, e a bola cai exatamente em seu interior.

Com esse resultado, ele garante que, se colocasse a cesta a uma distância horizontal 2d da mesa, seria necessário que ela ficasse abaixo do tampo da mesa

A) y/2. B) 2y. C) 3y. D) 4y. E) 5y.

06. (UFMG) Um corpo P é lançado horizontalmente de uma determinada altura. No mesmo instante, um outro corpo Q é solto em queda livre, a partir do repouso, dessa mesma altura, como mostra a figura.

Sejam v_P e v_Q os módulos das velocidades dos corpos P e Q, respectivamente, imediatamente antes de tocarem o chão, e t_P e t_Q os tempos despendidos por cada corpo nesse percurso. Despreze os efeitos da resistência do ar.

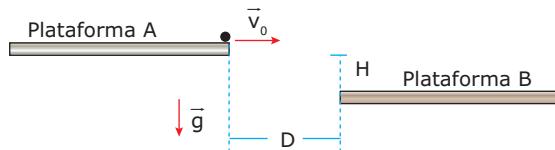
Nessas condições, pode-se afirmar que

A) $v_P = v_Q$ e $t_P > t_Q$.

B) $v_P = v_Q$ e $t_P = t_Q$.

C) $v_P > v_Q$ e $t_P > t_Q$.

D) $v_P > v_Q$ e $t_P = t_Q$.

07. (UFV-MG–2009) Uma bola é lançada horizontalmente com velocidade inicial v_0. Ao percorrer horizontalmente 30 m, ela cai verticalmente 20 m, conforme mostrado no gráfico a seguir. Considere a aceleração da gravidade igual a 10 m/s² e despreze a resistência do ar.

É **CORRETO** afirmar que o módulo da velocidade de lançamento v_0 é

A) 15 m/s.

B) 30 m/s.

C) 7,5 m/s.

D) 60 m/s.

08. (UFV-MG–2007) Um projétil é lançado horizontalmente de uma altura de 20 m, com uma velocidade inicial de módulo igual a 15 m/s. Desprezando-se a resistência do ar e considerando o módulo da aceleração gravitacional como 10 m/s², é **CORRETO** afirmar que o projétil atingirá o solo após ter percorrido uma distância horizontal igual a

A) 11 m.

B) 15 m.

C) 60 m.

D) 23 m.

E) 30 m.

09. (Unimontes-MG–2009) Uma bola, lançada horizontalmente da plataforma A, segue rumo à plataforma B. As plataformas estão separadas por um fosso de largura D. A está a uma altura H em relação a B (veja a figura). No local, a aceleração da gravidade é g. O **MENOR** valor do módulo v_0 da velocidade de lançamento da bola, para que atinja a plataforma B, é dado pela expressão

A) $v_0 = D\sqrt{\frac{g}{2H}}$.

B) $v_0 = H\sqrt{\frac{2D}{g}}$.

C) $v_0 = D\sqrt{\frac{2g}{H}}$.

D) $v_0 = H\sqrt{\frac{D}{2g}}$.

10. (PUCPR) Um projétil de massa 100 g é lançado obliquamente a partir do solo, para o alto, numa direção que forma 60° com a horizontal, com velocidade de 120 m/s, primeiro na Terra e posteriormente na Lua. Considerando a aceleração da gravidade da Terra o sêxtuplo da gravidade lunar, e desprezíveis todos os atritos nos dois experimentos, analise as proposições a seguir:

I. A altura máxima atingida pelo projétil é maior na Lua que na Terra.

II. A velocidade do projétil, no ponto mais alto da trajetória, será a mesma na Lua e na Terra.

III. O alcance horizontal máximo será maior na Lua.

IV. A velocidade com que o projétil toca o solo é a mesma na Lua e na Terra.

Está(ão) **CORRETA**(**S**)

A) apenas III e IV.

B) apenas II.

C) apenas III.

D) todas.

E) nenhuma delas.

11. (PUC Rio–2010) Um super atleta de salto em distância realiza o seu salto procurando atingir o maior alcance possível. Se ele se lança ao ar com uma velocidade cujo módulo é 10 m/s, e fazendo um ângulo de 45° em relação à horizontal, é **CORRETO** afirmar que o alcance atingido pelo atleta no salto é de

(Considere g = 10 m/s²)

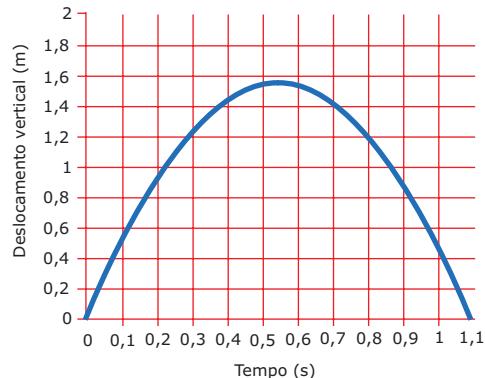
A) 2 m.

B) 4 m.

C) 6 m.

D) 8 m.

E) 10 m.

12. (PUC-Campinas-SP) Observando a parábola do dardo arremessado por um atleta, um matemático resolveu obter uma expressão que lhe permitisse calcular a altura y, em metros, do dardo em relação ao solo, decorridos t segundos do instante de seu lançamento (t_0 = 0). Se o dardo chegou à altura máxima de 20 m e atingiu o solo 4 segundos após o seu lançamento, então, desprezada a altura do atleta, a expressão que o matemático encontrou foi

A) $y = -5t^2 + 20t$.

B) $y = -5t^2 + 10t$.

C) $y = -5t^2 + t$.

D) $y = -10t^2 + 50$.

E) $y = -10t^2 + 10$.

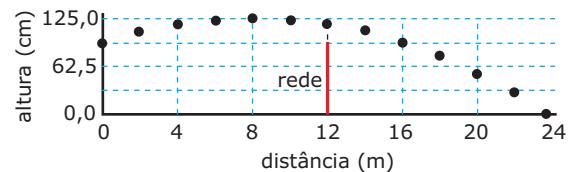
13. (Mackenzie-SP) Um balão (aerostato) parte do solo plano com movimento vertical, subindo com velocidade constante de 14 m/s. Ao atingir a altura de 25 m, seu piloto lança uma pedra com velocidade de 10 m/s, em relação ao balão e formando um ângulo de 37° em relação à horizontal. A distância entre a vertical que passa pelo balão e o ponto de impacto da pedra no solo é

Adote: g = 10 m/s²; cos 37° = 0,8; sen 37° = 0,6

A) 30 m.

B) 40 m.

C) 70 m.

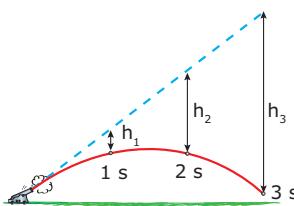
D) 90 m.

E) 140 m.

14. (Unicamp-SP) O famoso salto duplo *twist* carpado de Daiane dos Santos foi analisado durante um dia de treinamento no Centro Olímpico em Curitiba, através de sensores e filmagens que permitiram reproduzir a trajetória do centro de gravidade de Daiane na direção vertical (em metros), assim como o tempo de duração do salto. De acordo com o gráfico a seguir, **DETERMINE**

A) a altura máxima atingida pelo centro de gravidade de Daiane.

B) a velocidade média horizontal do salto, sabendo-se que a distância percorrida nessa direção é de 1,3 m.

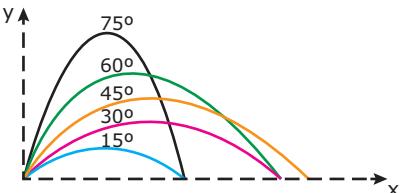
C) a velocidade vertical de saída do solo.

15. (Unicamp-SP) Uma bola de tênis rebatida numa das extremidades da quadra descreve a trajetória representada na figura a seguir, atingindo o chão na outra extremidade da quadra. O comprimento da quadra é de 24 m.

A) **CALCULE** o tempo de voo da bola, antes de atingir o chão. Desconsidere a resistência do ar nesse caso.

B) Qual é a velocidade horizontal da bola no caso anterior?

SEÇÃO ENEM

01. O estudo do movimento dos corpos lançados obliquamente sofreu grande impulso com a invenção dos canhões, uma vez que era necessário determinar com precisão o local onde os projéteis cairiam. A figura a seguir representa com uma linha pontilhada a trajetória de uma bala de canhão, caso o campo gravitacional fosse nulo, e representa com uma linha cheia a trajetória e a posição dos projéteis, depois de 1 s, 2 s e 3 s de lançamento, caso não houvesse resistência do ar. As alturas h_1, h_2 e h_3 representadas na figura têm valores, respectivamente, iguais a

(Considere g = 10m/s²)

Observação: o desenho não se encontra em escala.

A) 1 m, 2 m e 3 m.
B) 5 m, 20 m e 45 m.
C) 10 m, 20 m e 30 m.
D) 15 m, 25 m e 40 m.
E) 15 m, 30 m, 45 m.

02. O gráfico a seguir mostra a distância horizontal e vertical percorrida por uma bola de futebol quando chutada com a mesma velocidade inicial, porém com ângulos (em relação à horizontal) diferentes, e identificados sobre a curva. Nele, observa-se que:

- A distância horizontal é maior para um ângulo de lançamento igual a 45º;
- As distâncias horizontais são iguais para os pares de ângulos iguais a 15º e 75º, bem como para 30º e 60º.

Podemos explicar as duas observações simultaneamente devido

A) à distância horizontal ser diretamente proporcional ao valor do seno do dobro do ângulo de lançamento.
B) ao movimento da bola na direção horizontal ser independente no movimento na direção vertical.
C) à propriedade do campo gravitacional ser uniforme na região onde foi realizada a atividade.
D) às propriedades geométricas das curvas que descrevem o movimento da bola, no caso, uma parábola.
E) ao fato de a velocidade horizontal no ponto mais alto da trajetória não ser nula.

03. Uma esfera é lançada horizontalmente de uma mesa, sempre com a mesma velocidade, e atinge o solo a uma distância horizontal D da borda da mesa. Uma placa vertical pode ser posicionada a uma distância x dessa borda (0 < x < D), de modo a registrar as posições verticais de queda da esfera (figura 1). Em uma sequência de lançamentos, o prof. Ênnio, variando a posição x da placa, obteve o registro das posições verticais de queda da esfera, mostrada na figura 2.

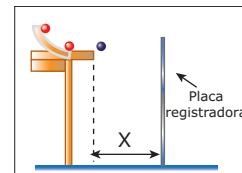



Figura 1 Figura 2

Analisando o registro das posições verticais de queda da esfera, podemos afirmar que

A) as medidas não foram feitas com precisão, uma vez que mostrou a esfera percorrendo distâncias iguais, como se seu movimento fosse uniforme.
B) o registro está incorreto, uma vez que o movimento da esfera é uma composição de dois movimentos independentes e acelerados.
C) se a placa for deslocada horizontalmente em intervalos de distâncias iguais (x, 2x, 3x, ...), a distância vertical de queda também será proporcional.
D) as posições registradas podem estar corretas, desde que os deslocamentos horizontais feitos pela placa tenham sido cada vez menores.
E) o resultado do registro mostrado na figura 2 somente seria possível se a placa estivesse colocada na posição horizontal.

GABARITO

Fixação

01. D 02. B 03. D 04. E 05. A

Propostos

01. B
02. A
03. C
04. B
05. D
06. D
07. A
08. E
09. A
10. D
11. E
12. A
13. B
14. A) $h_{MÁX.}$ = 1,55 m
B) v_x = 1,2 m/s
C) v_y = 5,5 m/s
15. A) t = 0,75 s
B) v_H = 32 m/s

Seção Enem

01. B 02. A 03. D

FÍSICA

Calorimetria

MÓDULO 03 FRENTE B

Anteriormente, vimos que o calor é um fluxo de energia no espaço, gerado por uma diferença de temperatura. Também aprendemos a estimar a taxa de transferência de calor, em função da diferença de temperatura, por meio das leis básicas da condução, da convecção e da radiação térmica. Agora, neste módulo, aprenderemos a calcular o calor que um corpo absorve ou cede em função do estado inicial e final desse corpo. Enquanto as leis de transferência vistas anteriormente levam em conta o tempo gasto na troca de calor, as equações do presente módulo são atemporais e fornecem simplesmente o calor trocado por um sistema. O uso combinado das duas formulações nos permitirá resolver novos problemas sobre a troca de calor entre os corpos.

Este módulo é dividido em duas partes básicas. Na primeira, serão estudadas situações em que o calor fornecido a um corpo, ou por ele liberado, provoca uma variação em sua temperatura. Na outra parte, estudaremos o caso em que a energia calorífica provoca uma mudança de fase em um corpo, fazendo-o passar, por exemplo, do estado sólido para o líquido. A influência da pressão sobre a mudança de fase de uma substância pura também será discutida neste módulo.

CALOR SENSÍVEL

Calor sensível é aquele que, ao ser fornecido a um corpo (ou ser cedido por ele), provoca uma variação na temperatura deste. Antes de apresentarmos a equação de cálculo do calor sensível, vamos definir duas propriedades físicas associadas ao calor sensível: a capacidade térmica e o calor específico. Para isso, apresentamos as principais unidades do calor.

Unidades do calor

Sendo uma forma de energia, o calor é expresso, no Sistema Internacional, em joule (J). No entanto, outra unidade bastante difundida para expressar a energia calorífica é a caloria (cal). A relação entre essas unidades é:

$$1 \text{ cal} = 4{,}18 \text{ J}$$

Certamente, você já teve contato com a unidade caloria em seu dia a dia ou em seus estudos de Química e Biologia. Por exemplo, o poder calórico dos alimentos é, em geral, fornecido em calorias. Um pãozinho e um copo de leite padrão apresentam um valor energético de 130 kcal (quilocalorias) e 70 kcal, respectivamente. O poder calorífico da gasolina usada nos motores automobilísticos vale cerca de 700 kcal/litro. Se a energia de 1 litro de gasolina fosse integralmente usada para elevar um foguete de massa igual a 100 kg, a altura atingida pelo foguete teria um valor próximo de 3 km. Para calcular essa altura, você deve converter o calor gerado na combustão de 1 litro do combustível para joules e depois igualar esse valor à energia potencial gravitacional adquirida pelo foguete.

Capacidade térmica

Observe o corpo cilíndrico mostrado na figura 1. O corpo pode ser aquecido homogeneamente por meio de uma resistência elétrica de baixa potência inserida em sua massa. Durante o aquecimento, a temperatura do corpo pode ser determinada, a cada instante, pela leitura do termômetro inserido no corpo. O calor absorvido pelo corpo é igual ao produto entre a potência elétrica dissipada pela resistência e o tempo de aquecimento. Considere, então, que o objeto receba uma quantidade de calor Q, e que a sua temperatura se eleve de ΔT. Definimos a capacidade térmica C do corpo, dentro da faixa de temperatura ensaiada, por meio da seguinte expressão:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

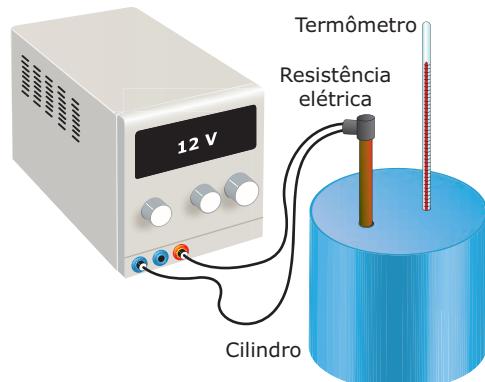



Figura 1: Experimento para determinação da capacidade térmica de um objeto.

A capacidade térmica de um corpo pode ser considerada constante dentro de uma ampla faixa de temperatura. Por exemplo, nessa experiência, se Q for igual a 1 000 J e ΔT for igual a 20 °C, a capacidade térmica do corpo será igual a 50 J/°C. Esse resultado indica que, para que a temperatura se eleve de 1 °C, o corpo tem de receber uma quantidade de calor de 50 J. Quando o corpo recebe 100 J, a elevação de temperatura é igual a 2 °C; para uma quantidade de calor recebida igual a 150 J, a temperatura aumenta de 3 °C, e assim por diante. Os mesmos valores são observados durante o resfriamento do corpo, de maneira que, para cada 50 J de calor liberado, a temperatura do corpo diminui de 1 °C. O aquecimento e o resfriamento da matéria são fenômenos simétricos.

Um objeto de alta capacidade térmica pode receber uma grande quantidade de calor e sofrer apenas uma pequena elevação de temperatura. Por exemplo, considere um corpo de capacidade térmica igual a 1 000 J/°C, e outro de capacidade térmica igual a 10 J/°C. O primeiro corpo,

ao receber uma quantidade de calor igual a 1 000 J, tem a sua temperatura elevada de apenas 1 °C. O corpo de baixa capacidade térmica, ao contrário, ao receber a mesma energia, terá sua temperatura elevada de 100 °C.

A capacidade térmica é uma propriedade extensiva, pois ela depende da massa do corpo. Em geral, objetos massivos apresentam elevada capacidade térmica e demandam mais tempo e energia para serem aquecidos ou resfriados. Por exemplo, uma batata, embrulhada em papel alumínio e assada ao forno, demora para se resfriar, enquanto o papel se resfria rapidamente. Dois corpos do mesmo material, mas de massas diferentes, apresentam capacidades térmicas diferentes. O corpo de maior massa apresenta maior capacidade térmica, precisando receber mais calor do que o outro para ter a temperatura elevada do mesmo valor. Por sua vez, corpos de materiais diferentes podem apresentar a mesma capacidade térmica. Por exemplo, uma panela de alumínio pode apresentar, dependendo da sua massa, a mesma capacidade térmica que um litro de água.

A seguir, vamos definir uma propriedade termodinâmica chamada calor específico. Em contraposição à capacidade térmica, o calor específico é uma propriedade intensiva da matéria, pois o seu valor independe da massa do corpo.

Calor específico

Vimos que a capacidade térmica representa o calor que um corpo deve receber (ou ceder) para ter a sua temperatura modificada de um valor unitário. Por sua vez, o calor específico representa a quantidade de calor que provoca uma variação unitária de temperatura sobre uma massa também unitária. Matematicamente, o calor específico pode ser definido da seguinte forma:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

Nessa equação, m é a massa do corpo, Q é o calor recebido (ou cedido) e ΔT é a variação de temperatura sofrida pelo corpo. A figura 2 é uma montagem simples para determinar o calor específico da água (ou de outro líquido), em que uma fonte de potência conhecida é usada para aquecer 1 kg de água (massa unitária). Experimentalmente, verifica-se que uma quantidade de calor igual a 4,18 kJ provoca uma elevação de 1 °C na temperatura da água (variação unitária). Substituindo esses valores na equação anterior, obtemos o seguinte valor para o calor específico da água:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{4{,}18\ \text{kJ}}{1\ \text{kg}.1\ °\text{C}} = 4{,}18\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}°\text{C}} = 1{,}0\ \frac{\text{cal}}{\text{g}°\text{C}}$$

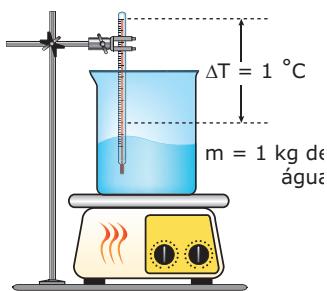



Figura 2: Experimento para a determinação do calor específico da água.

Para a maioria das substâncias, o calor específico varia muito pouco em uma ampla faixa de temperatura. Por isso, no experimento da figura 2, se a água for aquecida por mais tempo, de forma que o calor fornecido seja 10 vezes maior (Q = 41,8 kJ), a elevação de temperatura também será 10 vezes maior (ΔT = 10 °C). Se substituirmos esses valores na equação do calor específico, obteremos o mesmo valor de antes: 4,18 kJ/kg°C.

A tabela seguinte contém valores de calor específico de sólidos e líquidos a 20 °C. Observe que o calor específico dos metais é pequeno. A água, ao contrário, apresenta calor específico significativamente maior que o de outras substâncias.

Substância		cal/g°C	J/kg°C
Metais	Alumínio	0,22	$9{,}2 \times 10^2$
	Ferro	0,11	$4{,}6 \times 10^2$
	Cobre	0,10	$4{,}2 \times 10^2$
	Chumbo	0,031	$1{,}3 \times 10^2$
	Mercúrio (líq.)	0,034	$1{,}4 \times 10^2$
Sólidos não metálicos	Areia	0,19	$7{,}9 \times 10^2$
	Gelo	0,49	$2{,}0 \times 10^3$
	Banana	0,80	$3{,}3 \times 10^3$
Líquidos	Água	1,0	$4{,}2 \times 10^3$
	Leite de vaca	0,94	$3{,}9 \times 10^3$
	Etanol	0,59	$2{,}5 \times 10^3$
	Gasolina	0,50	$2{,}1 \times 10^3$

Usando um pouco de álgebra nas definições da capacidade térmica e do calor específico, concluímos que:

$$c = \frac{C}{m} \quad \text{ou} \quad C = mc$$

A segunda expressão indica que um corpo de grande massa e constituído de uma substância que possui grande calor específico apresenta elevada capacidade térmica. O melhor exemplo que podemos pensar é o mar. Além do alto calor específico da água, o valor elevado da massa do mar lhe confere uma capacidade térmica gigantesca. Por isso, o mar pode receber enormes quantidades de calor durante o dia sem que sua temperatura se eleve muito. À noite, o mar pode perder muito calor sem que sua temperatura sofra uma grande redução. Por isso, cidades a beira-mar tendem a apresentar uma amplitude térmica diária moderada (amplitude térmica é a diferença entre a temperatura ambiente máxima e mínima). Ao contrário, as regiões desérticas, como o Saara, possuem grandes amplitudes térmicas. Essas regiões apresentam uma superfície arenosa ou rochosa, que são substâncias de baixo calor específico. Nos desertos, durante o dia, a temperatura ambiente pode chegar a 40 °C e à noite ser próxima de 0 °C.

A equação operacional do calor específico pode ser rearranjada para a seguinte forma:

$$Q = mc\Delta T = C\Delta T$$

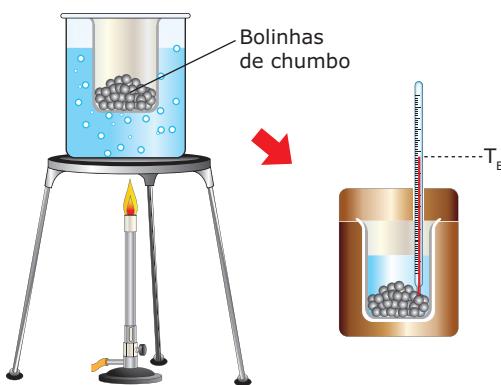
Essa equação é bastante útil, pois você pode usá-la para calcular o calor sensível recebido por um corpo, ou cedido por ele, em função da massa do corpo e da sua variação de temperatura. Para isso, é necessário conhecer também o material do corpo, a fim de poder obter o seu calor específico em uma tabela, como aquela apresentada anteriormente. Em alguns problemas, a capacidade térmica do corpo pode ser dada. Nesse caso, não é necessário conhecer o material do corpo, pois, como você pode ver na equação anterior, a capacidade térmica multiplicada pela variação de temperatura também fornece o calor sensível procurado.

Como exemplo, vamos calcular a quantidade de calor que uma pessoa absorve ao tomar um copo com 200 g de leite quente a 50 °C. As partes mais internas do corpo humano se acham a 38 °C, e essa é a temperatura final do leite depois de ele atingir o equilíbrio térmico no estômago. Usando o calor específico do leite dado na tabela anterior, 0,94 cal/g°C, obtemos o seguinte valor para o calor cedido pelo leite:

$$Q = 200\,\text{g}.0{,}94\,\frac{\text{cal}}{\text{g}\,°\text{C}}.(38 - 50)\,°\text{C} = -2\,256\ \text{cal}$$

Note que esse calor é negativo. A razão disso é que o calor foi cedido pelo leite, de maneira que a temperatura final do leite, 38 °C, é menor que a temperatura inicial, 50 °C. Por isso, ΔT é negativo, e Q também é negativo. Ao contrário, quando um corpo recebe calor, o sinal de Q é positivo. Você deve reter essas informações, pois elas serão importantes para resolver alguns problemas de Termodinâmica. De forma esquemática, temos:

$$\text{Calor}\begin{cases}\text{absorvido:} & Q > 0\\ \text{cedido:} & Q < 0\end{cases}$$

Finalizamos aqui a primeira parte deste módulo. A seguir, deixamos uma pergunta para você refletir e um exercício resolvido.

PARA REFLETIR

Por que os fragmentos incandescentes provenientes do esmerilhamento de uma peça de ferro não queimam a pele do operador, mas um copo com água fervente pode causar queimaduras graves?

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Um estudante coloca 500 g de chumbo em um recipiente metálico e usa água fervente para aquecer o chumbo a 100 °C, conforme mostra a primeira figura. A seguir, o estudante coloca o recipiente em um invólucro isolante, e acrescenta 150 g de água, inicialmente a 22 °C. Após alguns minutos, o estudante constata, por meio do termômetro mostrado na segunda figura, que a temperatura do sistema (água, chumbo e recipiente) atinge um valor de equilíbrio T_E. Estimar o valor da temperatura T_E. Citar as considerações feitas nessa estimativa.

Resolução:

Para estimar a temperatura T_E, vamos considerar que

i) o resfriamento do chumbo foi desprezível durante a colocação do recipiente no invólucro.

ii) a capacidade térmica do recipiente é desprezível, ou seja, ele não troca calor com a água e com o chumbo.

iii) o isolamento térmico do invólucro é perfeito, e todo o calor cedido pelo chumbo é absorvido pela água.

O calor cedido pelo chumbo (Q_C) é negativo, enquanto que o calor absorvido pela água (Q_A) é positivo. Como Q_C e Q_A são iguais em módulo, podemos escrever o seguinte balanço de energia:

$$Q_C + Q_A = 0$$

Substituindo as equações de calor sensível do chumbo e da água nessa expressão, obtemos:

$$500.0{,}031(T_E - 100) + 150.1{,}0(T_E - 22) = 0$$

Os valores do calor específico do chumbo e da água foram fornecidos pela tabela da seção anterior. Resolvendo a equação, achamos a temperatura de equilíbrio:

$$T_E = 29{,}3\ °\text{C}$$

Comentários:

Vamos fazer dois comentários sobre esse problema. O primeiro é sobre a pequena elevação de temperatura da água (apenas 7,3 °C), em comparação à expressiva redução de temperatura do chumbo (70,7 °C). A variação de temperatura do chumbo foi 9,7 vezes maior que a da água porque a capacidade térmica de 150 g de água é 9,7 vezes maior que a capacidade térmica de 500 g de chumbo. As capacidades térmicas das massas de água e de chumbo, obtidas pela equação C = mc, valem, respectivamente, 150 cal/°C e 15,5 cal/°C. De acordo com esses valores, o chumbo tem a sua temperatura variada de 1 ºC quando ele recebe uma pequena quantidade de calor, 15,5° cal, em contraposição à água, que deve receber uma quantidade de calor muito maior, 150 cal, para sofrer um aumento unitário de temperatura. Assim, é natural que a água tenha experimentado uma pequena variação de temperatura.

O outro comentário refere-se ao fato de a capacidade térmica do recipiente ter sido desprezada. Se considerarmos essa capacidade, a temperatura de equilíbrio será maior que 29,3 °C, pois o recipiente a 100 °C também fornecerá calor para a água, reforçando o seu aquecimento. Vamos fazer um cálculo para confirmar isso. Imagine que o recipiente seja de alumínio (c = 0,22 cal/g°C) e tenha uma massa m = 50 g.

Então, a sua capacidade térmica será igual a 11 cal/°C. Como o recipiente está inicialmente a 100 °C, ele também cede calor para a água. Assim, a equação de balanço de energia é:

$$500.0,031(T_E - 100) + 11(T_E - 100) + 150.1,0(T_E - 22) = 0$$

Resolvendo a equação, obtemos: T_E = 33,7 °C. Como esperado, esse valor é um pouco maior que aquele obtido sem levar em conta a capacidade térmica do recipiente.

MUDANÇA DE FASE

Fases da matéria

Na natureza, em geral, as substâncias se apresentam nas fases sólida, líquida e de vapor. As principais mudanças de fase da matéria estão indicadas na figura 3. Fusão é o nome dado à transformação que ocorre quando uma substância passa da fase sólida para a fase líquida. O processo inverso chama-se solidificação ou cristalização (no caso da água, é comum o termo congelamento). A vaporização e a condensação são os nomes dados às transformações que acontecem quando uma substância passa da fase líquida para a fase de vapor e vice-versa, respectivamente. Quando uma substância passa diretamente da fase sólida para a fase de vapor, temos uma transformação denominada sublimação. O processo inverso também é conhecido como sublimação, embora alguns autores usem o nome ressublimação ou mesmo cristalização.

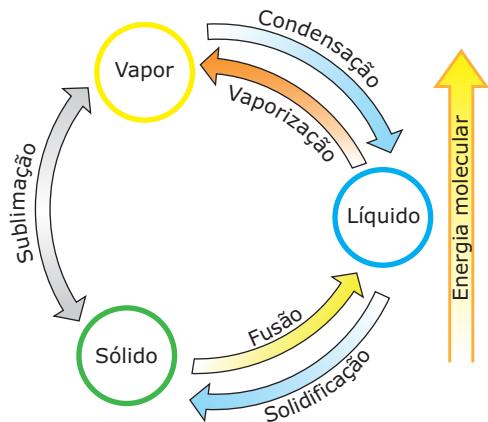



Figura 3: Principais mudanças de fase da matéria.

Quando ocorre a passagem do estado sólido ao estado líquido e deste ao estado de vapor, a matéria absorve energia. No sentido inverso, a matéria cede energia. Portanto, a energia molecular da matéria aumenta no sentido indicado na figura 3. Como você sabe, quando um corpo absorve calor e tem a sua temperatura aumentada, há um aumento da energia cinética das moléculas. Quando um líquido absorve calor à pressão constante, passando para o estado de vapor, as moléculas se afastam umas das outras. Nesse caso, o calor absorvido pela substância é convertido em trabalho para separar as moléculas. O calor convertido em trabalho, nessa situação (mudança de fase), não é usado para aumentar a energia cinética das moléculas, mas sim a energia potencial molecular. Como a temperatura é uma medida da energia cinética molecular, a substância não tem a sua temperatura alterada durante essa vaporização isobárica. Algo semelhante ocorre nas outras mudanças de fase.

Diagrama de fases

Uma substância pura é aquela cuja composição química não se altera durante um processo físico. A água, a amônia e o dióxido de carbono são exemplos de substâncias puras. Os pontos de fusão e de vaporização de uma substância pura dependem da pressão aplicada sobre ela. Para entender esse comportamento da matéria, vamos considerar água líquida em um frasco evacuado e fechado, como mostrado na figura 4. Parte da água evapora e preenche o espaço vazio do frasco. Observe, na figura, que, na interface entre o líquido e o vapor, há moléculas de água com velocidades voltadas para cima e outras com velocidades para baixo. No equilíbrio, o número de moléculas, por unidade de tempo, que passa do estado líquido para o estado de vapor é igual ao número de moléculas que faz o caminho inverso. Em outras palavras, a taxa de vaporização é igual à taxa de condensação. Nesse momento, a pressão exercida de baixo para cima pelo líquido é igual à pressão exercida de cima para baixo pelo vapor. Essa pressão é chamada de pressão de vapor, e o seu valor depende da temperatura da água. Por exemplo, se a água do frasco estiver à temperatura de 20 °C, a pressão de vapor será igual a 0,0231 atm. Se o frasco for aquecido, e a temperatura da água atingir um valor mais elevado, haverá mais vaporização de água, e um novo equilíbrio ocorrerá em uma pressão também mais elevada.

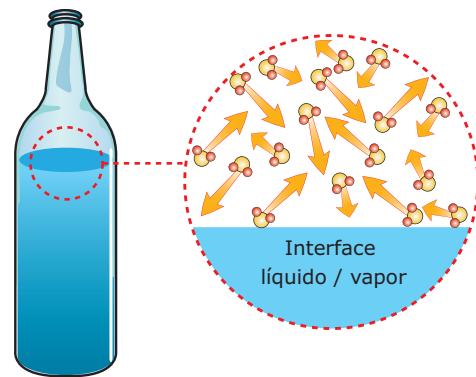



Figura 4: Interface líquido-vapor em equilíbrio.

Assim como na vaporização, as temperaturas de fusão e de sublimação também são correlacionadas com a pressão que age sobre a substância. Isso pode ser observado por meio do diagrama de fases da água mostrado na figura 5. Esse diagrama é um gráfico que correlaciona a pressão e a temperatura, a volume constante (como o volume do frasco da figura 4), de uma substância e a sua fase. As três curvas que aparecem no diagrama são as seguintes: a curva de fusão, que separa as regiões correspondentes às fases sólida e líquida, a curva de vapor, separando a fase líquida da fase de vapor, e a curva de sublimação, entre as fases sólida e de vapor. Assim, a fase em que determinada substância se encontra depende dos valores de pressão e temperatura aos quais a substância está submetida. Por exemplo, sob a pressão de 1 atm, a água é sólida abaixo de 0 °C, líquida entre 0 °C e 100 °C e encontra-se no estado de vapor acima de 100 °C.

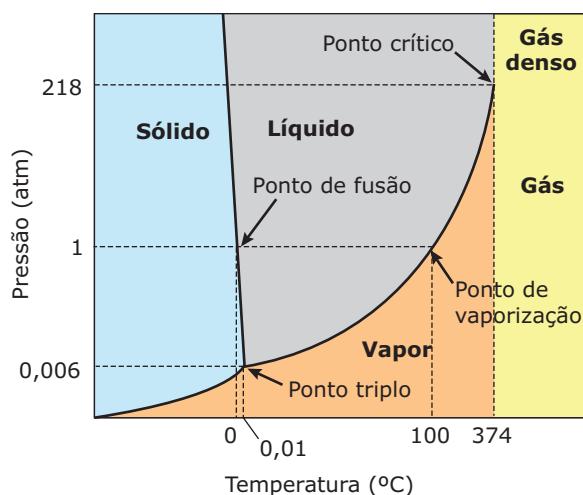



Figura 5: Diagrama de fases da água.

Observe o ponto de fusão no diagrama de fases da água, representado pelas coordenadas 0 °C e 1 atm. Quando uma massa de gelo a 1 atm e 0 °C recebe calor, a fusão do gelo se inicia, e a temperatura se mantém constante a 0 °C durante a mudança de fase. Observe que, para pressões maiores que 1 atm, a temperatura de fusão é um pouco menor que 0 °C. Essa redução do ponto de fusão com o aumento da pressão é uma característica de substâncias como a água, que sofrem contração durante a fusão. A maioria das substâncias se expande durante a fusão e apresenta uma curva de fusão inclinada para a direita, de maneira que o ponto de fusão cresce com o aumento da pressão.

Agora, observe o ponto de vaporização indicado no diagrama de fases da água, cujas coordenadas são 100 °C e 1 atm. Observe, no diagrama, que a pressão de vapor aumenta com a temperatura, conforme havíamos discutido anteriormente. Podemos citar muitos exemplos para ilustrar esse comportamento da água (e das outras substâncias puras). Em São Paulo, a altitude é de 800 m, a pressão atmosférica vale 0,9 atm, e o ponto de vaporização (fervura) da água é 98 °C. Em La Paz, capital da Bolívia, a altitude é de 4 000 m, a pressão atmosférica vale 0,7 atm, e a água ferve a 90 °C. Para altitudes ainda maiores, a água ferve em temperaturas ainda menores, e o cozimento de alguns alimentos pode ser bastante lento. Esse problema é facilmente resolvido com o uso de uma panela de pressão. Dentro dessas vasilhas, a pressão vale cerca de 2 atm, pressão na qual a água ferve a 120 °C. A tabela seguinte contém alguns valores da curva de pressão de vapor da água.

P (atm)	Local	T (°C)
0,01	Em laboratórios ou em altas camadas da atmosfera	7
0,02		18
0,34	Everest (altitude de 8 836 m)	71
1,0	Ao nível do mar	100
2,0	Em uma panela de pressão ou em caldeiras	120
3,0		134

Além dos pontos de fusão e de vaporização, existem mais dois pontos de destaque no diagrama da figura 5: o ponto triplo e o ponto crítico. No ponto triplo, as fases sólida, líquida e de vapor podem coexistir. Observe o diagrama de fase da água e veja que o gelo passa diretamente do estado sólido para o estado de vapor quando a pressão é menor do que 0,006 atm. O dióxido de carbono (CO_2) apresenta temperatura e pressão do ponto triplo de −56 °C e 5,1 atm. É por isso que o gelo seco (dióxido de carbono à baixa temperatura) sublima ao ar livre, uma vez que a pressão de 5,1 atm é consideravelmente maior do que a pressão atmosférica.

O ponto crítico é um balizador do estado gasoso. Usamos o termo gás para identificar os estados situados acima da temperatura crítica. Um vapor pode ser liquefeito (condensado) ou sublimado por meio de uma compressão isotérmica, entretanto, um gás não pode mudar de fase por meio desse processo. Você pode concluir isso por meio do diagrama da figura 5. No diagrama, trace duas retas verticais representando compressões isotérmicas: desenhe uma reta começando em um estado qualquer na região de vapor e a outra reta, na região de gás. Observe que a primeira compressão isotérmica corta a curva de vapor (ou a curva de sublimação, caso você tenha escolhido um estado inicial abaixo e à esquerda do ponto triplo), enquanto a segunda compressão isotérmica não corta nenhuma curva de mudança de fase.

De acordo com a substância, os valores da temperatura e da pressão do ponto crítico e do ponto triplo são muito diferentes. A tabela a seguir apresenta o ponto triplo e o ponto crítico de algumas substâncias. Observe que o metano possui uma temperatura crítica muito baixa, de apenas −83 °C. Assim, não é possível liquefazer o metano por simples compressão e estocá-lo em botijões no próprio local de extração do gás. É por isso que o metano e outros gases naturais são transportados através de extensos gasodutos, que vão desde as suas reservas até os locais de consumo. O butano, ao contrário, possui uma temperatura crítica de 152 °C, podendo, portanto, ser liquefeito e distribuído em botijões.

Substância	Ponto triplo		Ponto crítico	
	T (°C)	P (atm)	T (°C)	P (atm)
Água	0,01	0,006	374	218
CO_2	−56	5,1	31	73
Metano	−182	0,117	−83	46
Butano	−139	0,0000069	152	37
Nitrogênio	−210	0,12	−147	33

Ebulição e evaporação

A vaporização pode ocorrer por evaporação ou por ebulição. Enquanto a evaporação se dá na interface entre a fase líquida e a fase de vapor, a ebulição envolve todas as moléculas do líquido. Em geral, a evaporação ocorre lentamente e sem turbulências. Além disso, a temperatura de evaporação é independente da pressão atuante sobre o líquido. A ebulição é um processo turbulento e rápido, em que as bolhas de vapor se movimentam dentro do líquido devido às forças de empuxo. Ao contrário da evaporação, na ebulição, a temperatura em que ocorre a

vaporização depende da pressão atuante sobre a substância. Por exemplo, água a 1 atm em uma panela pode evaporar em temperaturas como 20 ºC ou 30 ºC, mas, para entrar em ebulição, ela precisa atingir 100 °C.

A taxa de evaporação depende de alguns fatores. Um deles é a área da superfície evaporativa. Quanto maior for essa área, maior será o número de moléculas de líquido em condições de passar para a fase de vapor. É por isso que uma roupa úmida seca mais rapidamente quando ela é estendida em um varal.

Outro fator que acelera a evaporação é a temperatura do líquido. A taxa de evaporação na superfície de uma xícara de chá quente é maior que a taxa de evaporação em uma xícara de chá morno, pois as moléculas de água no chá quente apresentam uma energia cinética maior do que a das moléculas presentes no chá morno.

A pressão sobre o líquido também interfere no processo de evaporação. Essa pressão atua dificultando a passagem de moléculas da fase líquida para a fase de vapor. Por isso, quanto menor for a pressão sobre o líquido, maior será a taxa de evaporação. Assim, uma poça de água tende a evaporar mais rapidamente no alto de uma montanha, onde a pressão atmosférica é baixa, do que em uma cidade ao nível do mar.

A presença de ventos é outro fator que acelera a evaporação. Como você sabe, uma roupa estendida no varal seca com mais facilidade quando está ventando. O vento que passa rente à roupa atua como uma espécie de vassoura, arrastando as moléculas de água que já sofreram evaporação. Se essas moléculas permanecessem aí, elas dificultariam a saída de outras moléculas de água da roupa.

O ponto de orvalho

Todos os componentes do ar atmosférico colaboram para o valor da pressão atmosférica. Por isso, essa pressão é igual à soma das pressões parciais exercidas pelo ar e pelo vapor de água presente na atmosfera. Em certo dia, essas pressões parciais podem valer, por exemplo, 0,98 atm e 0,02 atm, respectivamente (note que a soma é 1 atm, à pressão atmosférica local). Para a pressão de 0,02 atm, a temperatura de condensação ou de ebulição da água vale 18 °C (veja a primeira tabela da seção referente ao diagrama de fases). Essa temperatura é chamada de ponto de orvalho do ar. Esse valor, naturalmente, depende da concentração de vapor presente no ar. Uma atmosfera mais úmida apresenta uma pressão de vapor maior, e, consequentemente, um ponto de orvalho também maior.

Quando a temperatura do ar abaixa, ficando igual ou inferior ao ponto de orvalho, parte do vapor de água presente no ar sofre condensação. É exatamente isso o que ocorre quando você retira uma latinha de refrigerante de uma geladeira e a expõe ao ar ambiente. Como as paredes da latinha estão muito frias (em geral, abaixo de 10 °C), o ar próximo ao recipiente atinge o ponto de orvalho. As gotas de água que aparecem sobre as paredes da latinha são o resultado da condensação de vapor de água em contato com o metal frio.

Podemos citar muitos outros exemplos de condensação do vapor de água presente no ar. Nas manhãs de inverno, a fumaça que sai de sua boca, quando você respira forte, é o vapor de água que você expele se condensando ao entrar em contato com o ar ambiente frio. A fumaça que sai de uma xícara de café quente também é o resultado da condensação de vapor que sai do café e se condensa ao entrar em contato com o ar mais frio sobre a xícara. Assim, a fumaça que enxergamos não é vapor, mas sim pequenas gotas de água condensadas.

Calor latente

Neste tópico, vamos aprender a calcular o aporte de calor necessário para provocar uma mudança de fase. O calor necessário para uma substância mudar de fase é conhecido como calor latente. Estando à temperatura de mudança de fase, o calor necessário para promover uma mudança de fase é proporcional à massa da substância. A expressão para calcular esse calor é dada por:

$$Q = mL$$

Nessa equação, m é a massa da substância, e L é uma propriedade termodinâmica conhecida como calor latente de mudança de fase. Essa propriedade depende da substância, da pressão e do tipo de mudança de fase. Por exemplo, a água, sob a pressão de 1 atm, sofre fusão a 0 °C e entra em ebulição a 100 °C, apresentando um calor latente de fusão igual a 80 cal/g e um calor latente de vaporização igual a 540 cal/g. As interpretações físicas desses números são as seguintes: uma massa unitária de 1 g de água, a 1 atm e 0 °C, necessita receber 80 cal para passar do estado sólido para o estado líquido, enquanto a mesma massa unitária de água líquida, estando a 1 atm e 100 °C, precisa receber 540 cal para passar para o estado de vapor. Esses valores são exatamente os mesmos para as mudanças de fase inversas, a solidificação e a condensação. Porém, como esses processos resultam em uma liberação de calor, os valores do calor latente de solidificação e de condensação são negativos. Assim, para a água a 1 atm, os valores do calor latente de solidificação e de condensação valem −80 cal/g e −540 cal/g, respectivamente. A tabela a seguir contém o ponto de fusão (P_F) e de vaporização (P_V), bem como o calor latente de fusão (L_F) e de vaporização (L_V), de algumas substâncias puras à pressão de 1 atm.

Temperaturas e calores latentes de fusão e de vaporização de algumas substâncias a 1 atm

Substância	P_F (°C)	L_F (cal/g)	P_V (°C)	L_V (cal/g)
Nitrogênio	−210	6,1	−196	48
Etanol	−114	26	78	210
Água	0	80	100	540
Chumbo	327	5,9	1 750	205
Ferro	1 535	64	2 800	1 515

A título de exemplo, apresentamos, na figura 6, o gráfico da temperatura *versus* o tempo para o aquecimento de $1{,}0 \times 10^3$ g de gelo, inicialmente a −60 °C, que se acha em um recipiente aberto para a atmosfera a 1 atm. O calor é fornecido por uma fonte de calor a uma taxa constante de $1{,}0 \times 10^4$ cal/s. Observe que a temperatura se eleva inicialmente até 0 °C, que é o ponto de fusão do gelo. A fusão ocorre à temperatura constante. Depois de o gelo ser completamente fundido, a temperatura se eleva até 100 °C, que é o ponto de vaporização da água. Por último, o líquido se vaporiza à temperatura constante.

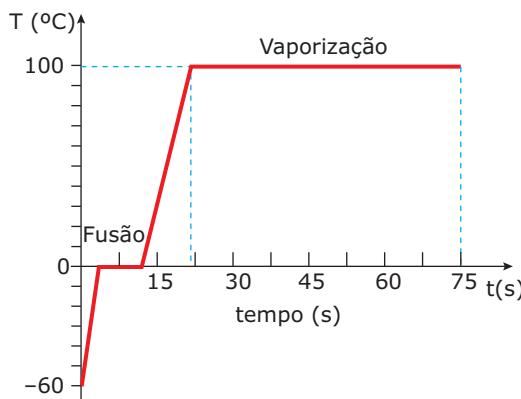
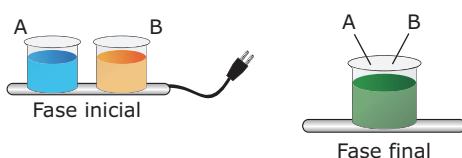



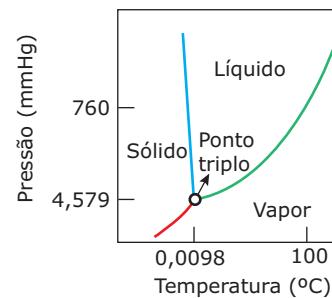
Figura 6: Aquecimento isobárico de 1,0 kg de gelo a –20 °C.

Os aportes de calor em cada etapa desse processo podem ser calculados por meio da equação do calor sensível ($Q = mc\Delta T$), para as etapas com elevação de temperatura, e pela equação do calor latente ($Q = mL$), para as etapas com mudança de fase. Os valores de **c** que você deve usar na primeira equação são 0,50 cal/g°C e 1,0 cal/g°C, que representam o calor específico do gelo e da água líquida, respectivamente. Na segunda equação, os valores de **L** são 80 cal/g e 540 cal/g, que representam o calor latente de fusão e de vaporização da água, respectivamente. Para encontrar os intervalos de tempo gastos em cada uma das quatro etapas do processo, basta dividir o calor de cada etapa pela potência de $1,0 \times 10^4$ cal/s da fonte de calor.

Finalizamos aqui a teoria deste módulo, deixando uma pergunta para você refletir.

PARA REFLETIR

Para manter uma bebida gelada, por que é melhor adicionar gelo a 0 °C do que a mesma massa de água líquida a 0 °C?

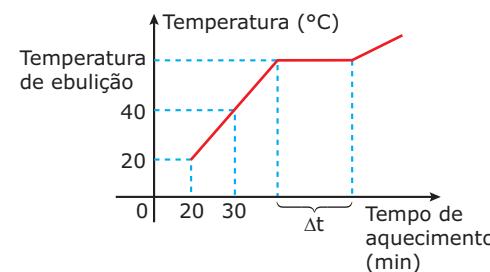
EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (FUVEST-SP–2007) Dois recipientes iguais, A e B, contendo dois líquidos diferentes, inicialmente a 20 °C, são colocados sobre uma placa térmica, da qual recebem aproximadamente a mesma quantidade de calor. Com isso, o líquido em A atinge 40 °C, enquanto o líquido em B, 80 °C. Se os recipientes forem retirados da placa e seus líquidos misturados, a temperatura final da mistura ficará em torno de

A) 45 °C.
B) 50 °C.
C) 55 °C.
D) 60 °C.
E) 65 °C.

02. (UFU-MG) Um aparelho de micro-ondas é utilizado para aquecer 100 g de água (calor específico igual a 1 cal/g°C), de 25 °C a 73 °C. O aparelho gera 100 W de potência, sendo que 80% da energia produzida atinge a água e é totalmente convertida em calor. Nessas condições, assinale a alternativa que corresponde a uma afirmação **VERDADEIRA**.

Observação: Use 1 cal = 4 J

A) A energia total gerada pelo aparelho de micro-ondas em cada segundo é de 80 J.
B) O calor absorvido pela água durante esse processo de aquecimento é de 4 800 J.
C) O rendimento desse processo é de 20%.
D) O tempo necessário para esse processo de aquecimento é de 4 minutos.

03. (UNIFESP–2009) A sonda Phoenix, lançada pela NASA, detectou em 2008 uma camada de gelo no fundo de uma cratera na superfície de Marte. Nesse planeta, o gelo desaparece nas estações quentes e reaparece nas estações frias, mas a água nunca foi observada na fase líquida. Com auxílio do diagrama de fase da água, analise as três afirmações seguintes:

I. O desaparecimento e o reaparecimento do gelo, sem a presença da fase líquida, sugerem a ocorrência de sublimação.
II. Se o gelo sofre sublimação, a pressão atmosférica local deve ser muito pequena, inferior à pressão do ponto triplo da água.
III. O gelo não sofre fusão porque a temperatura no interior da cratera não ultrapassa a temperatura do ponto triplo da água.

De acordo com o texto e com o diagrama de fases, pode-se afirmar que está **CORRETO** o contido em

A) I, II e III.
B) II e III, apenas.
C) I e III, apenas.
D) I e II, apenas.
E) I, apenas.

04. (PUC-SP–2007) O gráfico seguinte representa um trecho, fora de escala, da curva de aquecimento de 200 g de uma substância, aquecida por uma fonte de fluxo constante e igual a 232 cal/min.

FÍSICA

Sabendo que a substância em questão é uma das apresentadas na tabela a seguir, o intervalo de tempo Δt é, em minutos, um valor

Substância	Calor específico no estado líquido (cal/g°C)	Calor latente de ebulição (cal/g)
Água	1,0	540
Acetona	0,52	120
Ácido acético	0,49	94
Álcool etílico	0,58	160
Benzeno	0,43	98

A) acima de 130.
B) entre 100 e 130.
C) entre 70 e 100.
D) entre 20 e 70.
E) menor do que 20.

05. (UFMA–2007) Maria e João estavam acampados numa praia de São Luís, onde a temperatura ambiente era de 35 °C ao meio-dia. Nesse momento, verificaram que dois litros de água mineral estavam na temperatura ambiente. Resolveram então baixar a temperatura da água, colocando-a num recipiente de isopor juntamente com 200 g de gelo a –4 °C. Após a fusão de todo o gelo, e estabelecido o equilíbrio térmico da mistura, a temperatura da água era, aproximadamente,

Dados: L_{gelo} = 80 cal/g; c_{gelo} = 0,5 cal/g °C;

$c_{água}$ = 1,0 cal/g °C

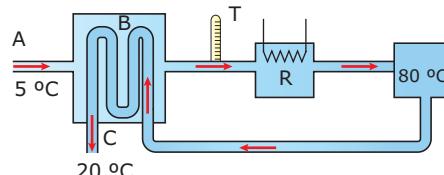
A) 26,9 °C.
B) 22,3 °C.
C) 24,4 °C.
D) 20,3 °C.
E) 29,4 °C.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (UFMG–2007) Numa aula de Física, o professor Carlos Heitor apresenta a seus alunos esta experiência: dois blocos – um de alumínio e outro de ferro –, de mesma massa e, inicialmente, à temperatura ambiente, recebem a mesma quantidade de calor, em determinado processo de aquecimento.

O calor específico do alumínio e o do ferro são, respectivamente, 0,90 J/(g°C) e 0,46 J/(g°C).

Questionados quanto ao que ocorreria em seguida, dois dos alunos, Alexandre e Lorena, fazem, cada um deles, um comentário:

- Alexandre: "Ao final desse processo de aquecimento, os blocos estarão à mesma temperatura."
- Lorena: "Após esse processo de aquecimento, ao se colocarem os dois blocos em contato, fluirá calor do bloco de ferro para o bloco de alumínio."

Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que

A) apenas o comentário de Alexandre está certo.
B) apenas o comentário de Lorena está certo.
C) ambos os comentários estão certos.
D) nenhum dos dois comentários está certo.

02. (FCMMG) A Lua é um satélite árido, sem atmosfera, com montanhas rochosas, planícies e crateras. Quando uma de suas metades está iluminada pelo Sol, sua temperatura pode chegar a 120 °C, enquanto, no mesmo momento, a face escura pode ter uma temperatura em torno de 150 °C abaixo de zero. Essa grande variação de temperatura é explicada, principalmente, por uma característica física das rochas, isto é,

A) o seu calor latente.
B) a sua capacidade térmica.
C) o seu calor específico.
D) o seu coeficiente de dilatação.

03. (FUVEST-SP) Dois recipientes de material termicamente isolante contêm cada um 10 g de água a 0 °C. Deseja-se aquecer até uma mesma temperatura os conteúdos dos dois recipientes, mas sem misturá-los. Para isso, é usado um bloco de 100 g de uma liga metálica inicialmente à temperatura de 90 °C. O bloco é imerso durante um certo tempo num dos recipientes e depois transferido para o outro, nele permanecendo até ser atingido o equilíbrio térmico. O calor específico da água é dez vezes maior que o da liga. A temperatura do bloco, por ocasião da transferência, deve então ser igual a

A) 10 °C.
B) 20 °C.
C) 40 °C.
D) 60 °C.
E) 80 °C.

04. (FUVEST-SP) O processo de pasteurização do leite consiste em aquecê-lo a altas temperaturas, por alguns segundos, e resfriá-lo em seguida. Para isso, o leite percorre um sistema, em fluxo constante, passando por três etapas:

I. O leite entra no sistema (através de A), a 5 °C, sendo aquecido (no trocador de calor B) pelo leite que já foi pasteurizado e está saindo do sistema.

II. Em seguida, completa-se o aquecimento do leite, através da resistência R, até que ele atinja 80 °C. Com essa temperatura, o leite retorna a B.

III. Novamente, em B, o leite quente é resfriado pelo leite frio que entra por A, saindo do sistema (através de C), a 20 °C.

Em condições de funcionamento estáveis, e supondo que o sistema seja bem isolado termicamente, pode-se afirmar que a temperatura indicada pelo termômetro T, que monitora a temperatura do leite na saída de B, é aproximadamente de

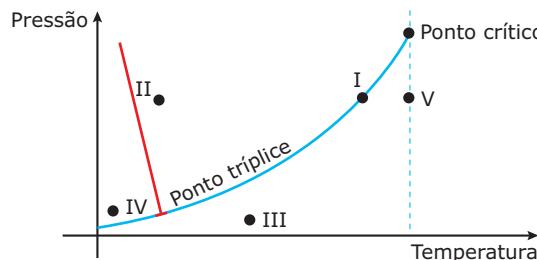
A) 20 °C.
B) 25 °C.
C) 60 °C.
D) 65 °C.
E) 75 °C.

05. (Unimontes-MG–2007) Num calorímetro de capacidade térmica 10,0 cal/°C, tem-se uma substância líquida de massa 200 g e calor específico de 0,2 cal/g.°C, a 60 °C. Adicionando-se nesse calorímetro uma massa de 100 g e de calor específico 0,1 cal/g.°C, à temperatura de 30 °C, a temperatura de equilíbrio será de

A) 55 °C.
B) 45 °C.
C) 30 °C.
D) 70 °C.

06. (UFT–2007) Após mergulharem em uma piscina e, em seguida, saírem dela, Daniel e André fazem observações sobre o que cada um deles sentiu durante aquela experiência.

Daniel disse: "Quando mergulhei, imediatamente senti frio, devido à transmissão de calor, por condução, do meu corpo para a água da piscina."

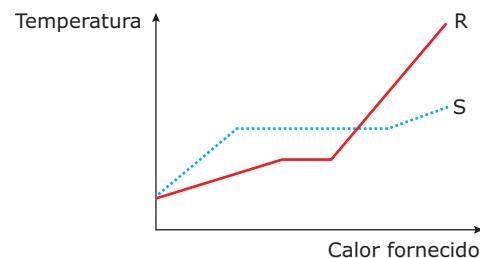
André afirmou: "Assim que saí da piscina, senti frio devido ao calor latente de vaporização da água."

Considerando-se as duas situações descritas, é **CORRETO** afirmar que

A) apenas a observação de André está certa.

B) apenas a observação de Daniel está certa.

C) ambas as observações estão certas.

D) nenhuma das duas observações está certa.

07. (EFOA-MG) Colocando água gelada no interior de um copo de vidro seco, observa-se, com o passar do tempo, a formação de gotículas de água na parede externa do copo. Isso se deve ao fato de que

A) a água gelada atravessa a parede do copo.

B) as gotas de água sobem pela parede interna do copo alcançando a parede externa, onde se depositam.

C) a água fria cria microfissuras na parede do copo de vidro, pelas quais a água passa para fora.

D) o vapor de água presente na atmosfera se condensa.

E) o copo é de vidro.

08. (CEFET-PR) A geada é um fenômeno que ocorre durante a estação fria no Sul do Brasil. Esse fenômeno pode ser ilustrado no diagrama de estado da água, na transformação de

A) I para II.

B) V para IV.

C) III para IV.

D) I para V.

E) II para III.

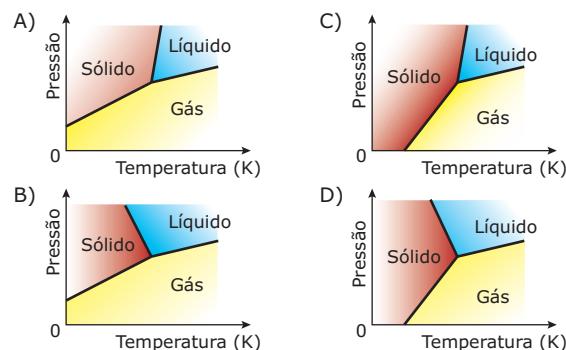
09. (UFMG–2009) Num laboratório de Física, faz-se uma experiência com dois objetos de materiais diferentes – R e S –, mas de mesma massa, ambos, inicialmente, no estado sólido e à temperatura ambiente. Em seguida, os dois objetos são aquecidos e, então, mede-se a temperatura de cada um deles em função da quantidade de calor que lhes é fornecida. Os resultados obtidos nessa medição estão representados neste gráfico:

Sejam L_R e L_S o calor latente de fusão dos materiais R e S, respectivamente, e c_R e c_S o calor específico dos materiais, no estado sólido, também respectivamente. Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que

A) $c_R < c_S$ e $L_R < L_S$.

B) $c_R < c_S$ e $L_R > L_S$.

C) $c_R > c_S$ e $L_R < L_S$.

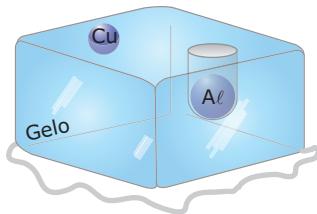
D) $c_R > c_S$ e $L_R > L_S$.

10. (UFV-MG–2007) No interior de um calorímetro de capacidade térmica desprezível, são misturados 120 g de gelo a −15 °C e 5 g de água líquida a 20 °C. O calorímetro é mantido hermeticamente fechado, à pressão interna de 1,0 atm, condição em que o calor latente de fusão do gelo é 80 cal/g, os calores específicos do gelo e da água líquida são, respectivamente, 0,5 cal/(g°C) e 1,0 cal/(g°C), e a temperatura de fusão do gelo é 0 °C. É **CORRETO** concluir, então, que, na situação de equilíbrio térmico, haverá, no interior do calorímetro,

A) apenas água líquida, à temperatura acima de 0 °C.

B) água líquida e gelo, à temperatura de 0 °C.

C) apenas gelo, à temperatura de 0 °C.

D) apenas gelo, à temperatura abaixo de 0 °C.

E) apenas água líquida, à temperatura de 0 °C.

11. (UFMG–2010) Considere estas informações:

- a temperaturas muito baixas, a água está sempre na fase sólida;
- aumentando-se a pressão, a temperatura de fusão da água diminui.

Assinale a alternativa em que o diagrama de fases pressão *versus* temperatura para a água está de acordo com essas informações.

12. (UFMG) Júlia coloca uma esfera de cobre e uma de alumínio, ambas de mesma massa e à mesma temperatura, sobre um bloco de gelo. Após um certo tempo, ela observa que essas esferas permanecem em equilíbrio nas posições indicadas nesta figura:

Todas as dimensões estão representadas em escala na figura. Sejam d_{Cu} e $d_{A\ell}$ as densidades e c_{Cu} e $c_{A\ell}$ os calores específicos, respectivamente, do cobre e do alumínio. Com base nessas informações, é **CORRETO** afirmar que

A) $d_{Cu} < d_{A\ell}$ e $c_{Cu} > c_{A\ell}$.

B) $d_{Cu} > d_{A\ell}$ e $c_{Cu} < c_{A\ell}$.

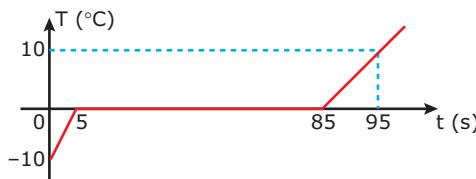
C) $d_{Cu} < d_{A\ell}$ e $c_{Cu} < c_{A\ell}$.

D) $d_{Cu} > d_{A\ell}$ e $c_{Cu} > c_{A\ell}$.

13. (UERJ–2010) A tabela a seguir mostra apenas alguns valores, omitindo outros, para três grandezas associadas a cinco diferentes objetos sólidos:

- massa;
- calor específico;
- energia recebida ao sofrer um aumento de temperatura de 10 ºC.

Objetos	m (g)	c (cal·g⁻¹·ºC⁻¹)	Q (cal)
I		0,3	300
II		0,2	400
III	150		450
IV	150	0,4	
V	100	0,5	

A alternativa que indica, respectivamente, o objeto de maior massa, o de maior calor específico e o que recebeu maior quantidade de calor é:

A) I, III e IV
B) I, II e IV
C) II, IV e V
D) II, V e IV

14. (ITA-SP–2006) Um bloco de gelo com 725 g de massa é colocado num calorímetro contendo 2,50 kg de água a uma temperatura de 5,0 ºC, verificando-se um aumento de 64 g na massa desse bloco, uma vez alcançado o equilíbrio térmico. Considere o calor específico da água (c = 1,0 cal/g ºC) o dobro do calor específico do gelo, e o calor latente de fusão do gelo de 80 cal/g. Desconsiderando a capacidade térmica do calorímetro e a troca de calor com o exterior, assinale a temperatura inicial do gelo.

A) –191,4 ºC
B) –48,6 ºC
C) –34,5 ºC
D) –24,3 ºC
E) –14,1 ºC

15. (UFMG) Colocando-se uma esfera de ferro de massa 100 g na cavidade de um bloco de gelo a 0 °C, observa-se a fusão de 30 g de gelo, quando a temperatura da esfera passa de 200 ºC para a do gelo. **CALCULE** o calor específico do ferro, sabendo-se que são necessárias 80 calorias para fundir 1 grama de gelo.

16. (FUVEST-SP) O gráfico representa a variação, com o tempo, da temperatura de um sistema constituído de um pedaço de gelo de 500 g a –10 ºC.

A) **DESCREVA** o estado físico do sistema entre os instantes 5 s e 85 s.

B) Se o calor específico do gelo é de 0,50 cal/g°C, **CALCULE** a quantidade de calor absorvida pelo gelo entre os instantes 0 e 5 s.

17. (UFJF-MG–2006) Um bloco de chumbo de 6,68 kg é retirado de um forno a 300 °C e colocado sobre um grande bloco de gelo a 0 °C. Supondo que não haja perda de calor para o meio externo, qual é a quantidade de gelo que deve ser fundida?

Dados:

- calor específico do gelo a 0 °C = 2 100 J/(kg.K)
- calor latente de fusão do gelo = 334 x 10^3 J/kg
- calor específico do chumbo = 230 J/(kg.K)
- calor latente de fusão do chumbo = 24,5 x 10^3 J/kg
- temperatura de fusão do chumbo = 327 °C

SEÇÃO ENEM

01. (Enem–2010) Sob pressão normal (ao nível do mar), a água entra em ebulição à temperatura de 100 °C. Tendo por base essa informação, um garoto residente em uma cidade litorânea fez a seguinte experiência:

- Colocou uma caneca metálica contendo água no fogareiro do fogão de sua casa.
- Quando a água começou a ferver, encostou cuidadosamente a extremidade mais estreita de uma seringa de injeção, desprovida de agulha, na superfície do líquido e, erguendo o êmbolo da seringa, aspirou certa quantidade de água para seu interior, tapando-a em seguida.
- Verificando após alguns instantes que a água da seringa havia parado de ferver, ele ergueu o êmbolo da seringa, constatando, intrigado, que a água voltou a ferver após um pequeno deslocamento do êmbolo.

Considerando o procedimento anterior, a água volta a ferver porque esse deslocamento

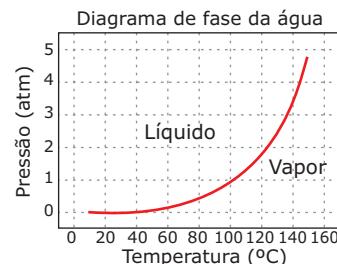
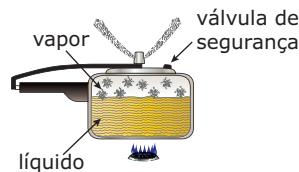
A) permite a entrada de calor do ambiente externo para o interior da seringa.

B) provoca, por atrito, um aquecimento da água contida na seringa.

C) produz um aumento de volume que aumenta o ponto de ebulição da água.

D) proporciona uma queda de pressão no interior da seringa que diminui o ponto de ebulição da água.

E) possibilita uma diminuição da densidade da água que facilita sua ebulição.

02. (Enem–2009) O Sol representa uma fonte limpa e inesgotável de energia para o nosso planeta. Essa energia pode ser captada por aquecedores solares, armazenada e convertida posteriormente em trabalho útil. Considere determinada região cuja insolação – potência solar incidente na superfície da Terra – seja de 800 watts/m^2. Uma usina termossolar utiliza concentradores solares parabólicos que chegam a dezenas de quilômetros de extensão. Nesses coletores solares parabólicos, a luz refletida pela superfície parabólica espelhada é focalizada em um receptor em forma de cano e aquece o óleo contido em seu interior a 400 °C. O calor desse óleo é transferido para a água, vaporizando-a em uma caldeira. O vapor em alta pressão movimenta uma turbina acoplada a um gerador de energia elétrica.

Considerando que a distância entre a borda inferior e a borda superior da superfície refletora tenha 6 m de largura e que focaliza no receptor os 800 watts/m^2 de radiação provenientes do Sol, e que o calor específico da água é 1 cal g^{-1}.ºC^{-1} = 4 200 J kg^{-1} ºC^{-1}, então o comprimento linear do refletor parabólico necessário para elevar a temperatura de 1 m^3 (equivalente a 1 t) de água de 20 °C para 100 °C, em uma hora, estará entre

A) 15 m e 21 m.

B) 22 m e 30 m.

C) 105 m e 125 m.

D) 680 m e 710 m.

E) 6 700 m e 7 150 m.

03. (Enem–2006) A Terra é cercada pelo vácuo espacial e, assim, ela só perde energia ao irradiá-la para o espaço. O aquecimento global que se verifica hoje decorre de pequeno desequilíbrio energético, de cerca de 0,3%, entre a energia que a Terra recebe do Sol e a energia irradiada a cada segundo, algo em torno de 1 W/m^2. Isso significa que a Terra acumula, anualmente, cerca de $1,6 \times 10^{22}$ J. Considere que a energia necessária para transformar 1 kg de gelo a 0 ºC em água líquida seja igual a $3,2 \times 10^5$ J. Se toda a energia acumulada anualmente fosse usada para derreter o gelo nos polos (a 0 ºC), a quantidade de gelo derretida anualmente, em trilhões de toneladas, estaria entre

A) 20 e 40.

B) 40 e 60.

C) 60 e 80.

D) 80 e 100.

E) 100 e 120.

04. (Enem–1999) A panela de pressão permite que os alimentos sejam cozidos em água muito mais rapidamente do que em panelas convencionais. Sua tampa possui uma borracha de vedação que não deixa o vapor escapar, a não ser através de um orifício central sobre o qual assenta um peso que controla a pressão. Quando em uso, desenvolve-se uma pressão elevada no seu interior. Para a sua operação segura, é necessário observar a limpeza do orifício central e a existência de uma válvula de segurança, normalmente situada na tampa. O esquema da panela de pressão e um diagrama de fase da água são apresentados a seguir.

A vantagem do uso de panela de pressão é a rapidez para o cozimento de alimentos e isto se deve

A) à pressão no seu interior, que é igual à pressão externa.

B) à temperatura de seu interior, que está acima da temperatura de ebulição da água no local.

C) à quantidade de calor adicional que é transferida à panela.

D) à quantidade de vapor que está sendo liberada pela válvula.

E) à espessura da sua parede, que é maior que a das panelas comuns.

05. (Enem–1999) Se, por economia, abaixarmos o fogo sob uma panela de pressão logo que se inicia a saída de vapor pela válvula, de forma simplesmente a manter a fervura, o tempo de cozimento

A) será maior, porque a panela esfria.

B) será menor, pois diminui a perda de água.

C) será maior, pois a pressão diminui.

D) será maior, pois a evaporação diminui.

E) não será alterado, pois a temperatura não varia.

06. (Enem–2009) A água apresenta propriedades físico-químicas que a coloca em posição de destaque como substância essencial à vida. Entre essas, destacam-se as propriedades térmicas biologicamente muito importantes, por exemplo, o elevado valor de calor latente de vaporização. Esse calor latente refere-se à quantidade de calor que deve ser adicionada a um líquido em seu ponto de ebulição, por unidade de massa, para convertê-lo em vapor na mesma temperatura, que, no caso da água, é igual a 540 calorias por grama.

A propriedade físico-química mencionada no texto confere à água a capacidade de

A) servir como doador de elétrons no processo de fotossíntese.

B) funcionar como regulador térmico para os organismos vivos.

C) agir como solvente universal nos tecidos animais e vegetais.

D) transportar os íons de ferro e magnésio nos tecidos vegetais.

E) funcionar como mantenedora do metabolismo nos organismos vivos.

07. (Enem–2009) *A Constelação Vulpécula (Raposa) encontra-se a 63 anos-luz da Terra, fora do sistema solar. Ali, o planeta gigante HD 189733b, 15% maior que Júpiter, concentra vapor de água na atmosfera. A temperatura do vapor atinge 900 graus Celsius. "A água sempre está lá, de alguma forma, mas às vezes é possível que seja escondida por outros tipos de nuvens", afirmaram os astrônomos do Spitzer Science Center (SSC), com sede em Pasadena, Califórnia, responsável pela descoberta. A água foi detectada pelo espectrógrafo infravermelho, um aparelho do telescópio espacial Spitzer.*

CORREIO BRAZILIENSE, 11 dez. 2008 (Adaptação).

De acordo com o texto, o planeta concentra vapor de água em sua atmosfera a 900 graus Celsius. Sobre a vaporização, infere-se que

A) se há vapor de água no planeta, é certo que existe água no estado líquido também.

B) a temperatura de ebulição da água independe da pressão, em um local elevado ou ao nível do mar, ela ferve sempre a 100 graus Celsius.

C) o calor de vaporização da água é o calor necessário para fazer 1 kg de água líquida se transformar em 1 kg de vapor de água a 100 graus Celsius.

D) um líquido pode ser superaquecido acima de sua temperatura de ebulição normal, mas de forma nenhuma nesse líquido haverá formação de bolhas.

E) a água em uma panela pode atingir a temperatura de ebulição em alguns minutos, e é necessário muito menos tempo para fazer a água vaporizar completamente.

GABARITO

Fixação

01. B
02. D
03. D
04. A
05. C

Propostos

01. B
02. C
03. D
04. D
05. A
06. C
07. D
08. C
09. C
10. D
11. D
12. B
13. D
14. B
15. c = 0,12 cal/g.°C
16. A) sólido + líquido, ocorrendo fusão
    B) 2 500 cal
17. m = 1,38 kg

Seção Enem

01. D
02. A
03. B
04. B
05. E
06. B
07. C

FÍSICA

Gases

MÓDULO 04 FRENTE B

Um gás é formado por moléculas ou átomos que se movem caoticamente. Além de existir muito espaço vazio entre essas partículas, a força de ligação entre elas é pequena, se comparada à força de coesão molecular dos sólidos e dos líquidos. Enquanto o volume de um sólido ou de um líquido depende quase que exclusivamente da temperatura, o volume de um gás é sensível à temperatura e à pressão aplicada. A alta compressibilidade dos gases os distingue dos sólidos e dos líquidos.

Neste módulo, vamos analisar o comportamento físico dos gases. Iniciaremos esse estudo explicando o que é um gás ideal e apresentando um critério para classificar um gás em ideal ou não ideal. Depois, relacionaremos a pressão, o volume e a temperatura de um gás ideal por meio de uma equação de estado. A seguir, usaremos essa equação para estudar várias transformações em gases ideais, tais como uma expansão isotérmica e o aquecimento isovolumétrico. Por fim, apresentaremos um modelo físico capaz de prever valores de pressão e de temperatura de um gás ideal em função da velocidade de suas moléculas.

GÁS IDEAL

O critério de classificação de um gás ideal

Um gás é ideal quando as suas moléculas ou átomos se acham tão distantes uns dos outros que a força de interação entre eles é desprezível. Nessas condições, eles se movem livremente, e um modelo simples pode ser usado para prever o comportamento físico do gás. Um gás tende ao comportamento de gás ideal à medida que a sua densidade diminui, pois isso implica o aumento do distanciamento molecular. A densidade de um gás, por sua vez, diminui à medida que a temperatura aumenta e a pressão sobre o gás diminui. A rigor, um gás comporta-se idealmente quando sua temperatura é muito maior que a temperatura crítica para aquele gás e quando a pressão é muito menor que a pressão crítica. A tabela seguinte apresenta a temperatura e a pressão críticas de algumas substâncias puras.

Temperatura e pressão críticas de algumas substâncias

Gás	T_c (°C)	P_c (atm)
Oxigênio	−118	50
Nitrogênio	−147	33
Dióxido de carbono	31	73
Amônia	133	112
Água	374	218

Observe que o oxigênio e o nitrogênio apresentam temperaturas críticas muito baixas, bem menores do que qualquer temperatura ambiente na Terra. Além disso, os valores da pressão crítica desses gases são muitas vezes maiores do que as pressões parciais que eles exercem na atmosfera terrestre. Por isso, oxigênio e nitrogênio, em condições atmosféricas, comportam-se como gases ideais. Porém, quando comprimidos a pressões de 100 atm ou mais, o oxigênio e o nitrogênio deixam de se comportar como gases ideais. O ar atmosférico é constituído de nitrogênio, oxigênio e traços de outros gases, como o argônio e o dióxido de carbono. Nas condições da atmosfera da Terra, todos esses gases se comportam como ideais. Por isso, o comportamento do ar atmosférico é bem próximo do comportamento de um gás ideal.

A equação de estado de um gás ideal

A pressão (P), o volume (V) e a temperatura absoluta (T) de um gás ideal relacionam-se por meio de uma expressão conhecida como equação de estado de um gás ideal. Para obter essa equação, vamos descrever uma experiência envolvendo três amostras gasosas, uma de amônia, uma de nitrogênio e outra de oxigênio. Os gases acham-se à temperatura ambiente e estão contidos em cilindros dotados de um êmbolo. A experiência consiste em reduzir lentamente a pressão sobre os gases, de maneira que a temperatura permaneça constante. Como consequência, os volumes dos gases aumentam e as suas densidades diminuem.

A figura 1 mostra o resultado da experiência por meio de um gráfico, cuja abscissa é a densidade e cuja ordenada é o quociente PV/(nT) dos gases. Nesse quociente, o fator n mede a quantidade de gás em mols (ou múltiplos e submúltiplos do mol). Um mol de partículas significa $6{,}02 \times 10^{23}$ partículas. A quantidade n relaciona-se com a massa da amostra gasosa (m) e com a massa molar do gás (M) por meio da seguinte razão:

$$n = \frac{m}{M}$$

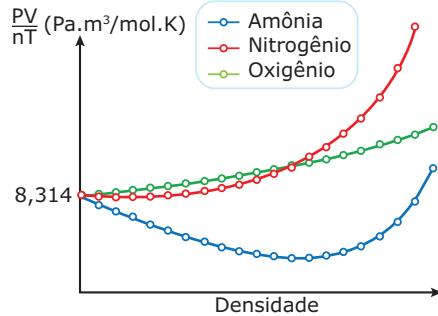



Figura 1: Curvas de PV/(nT) em função da densidade à temperatura ambiente.

Note que as três curvas convergem para o mesmo valor, 8,314 Pa.m³/mol.K, quando as densidades dos gases se aproximam de zero, ou seja, quando o gás se aproxima do comportamento ideal. Essa tendência, de fato, é verificada para qualquer gás. O valor para o qual o quociente PV/(nT) converge é conhecido como constante universal dos gases ideais, R. Igualando PV/(nT) à constante R, e rearranjando os termos, obtemos a seguinte expressão:

$$PV = nRT$$

Essa é a equação de estado que estávamos procurando, chamada de equação de Clapeyron. No uso dessa equação, os dois valores mais usuais para a constante universal dos gases são:

$$R = 8{,}314\,\frac{Pa.m^3}{mol.K} = 0{,}08207\,\frac{atm.L}{mol.K}$$

A unidade Pa.m³/mol.K pode ser expressa como J/mol.K, pois 1 Pa (pascal, unidade de pressão no Sistema Internacional) é igual a 1 N/m², e 1 N.m é igual a 1 J. Usando uma calculadora, verifique que os dois valores de R apresentados anteriormente são equivalentes (lembre-se, ainda, de que 1 atm = $1{,}013 \times 10^5$ Pa e 1 m³ = 10^3 L). Na prática, você pode usar qualquer um dos valores de R, desde que haja coerência com as unidades escolhidas para as outras grandezas. Quando você usar R = 8,314 J/mol.K, as unidades de P e V devem ser N/m² e m³, respectivamente. No outro caso, para R = 0,08207 atm.L/mol.K, as unidades de P e V devem ser atm e L, respectivamente. Nos dois casos, n é dado em mol e a temperatura, em kelvin.

A título de exemplo, usaremos a equação de Clapeyron para calcular a massa de oxigênio no balão de 0,5 L mostrado na figura 2. A temperatura do gás é a mesma do laboratório, 22 °C (295 K) e é indicada por um termômetro de ambiente. A pressão do gás é registrada pelo manômetro (tubo em U), que usa mercúrio como fluido de trabalho. Essa pressão é de 2 atm, valor dado pela soma da pressão atmosférica, 1 atm, com a pressão de 1 atm exercida pela coluna de 76 cm de mercúrio. O volume de gás expandido no tubo do manômetro é desprezível se comparado ao volume do balão (a figura está fora de escala).

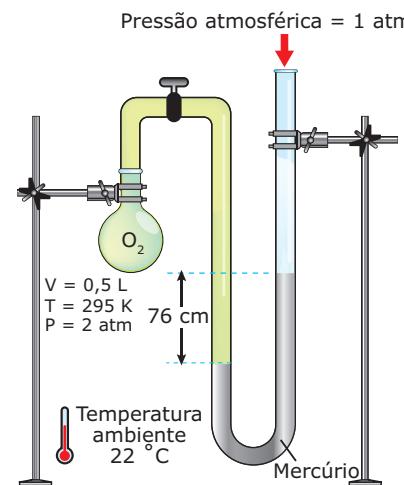



Figura 2: Experimento para determinação da massa de oxigênio no balão.

Substituindo os dados na equação de Clapeyron, achamos a seguinte quantidade de oxigênio no balão:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{2.0{,}5}{0{,}082.295} = 0{,}041\ \text{mol}$$

Utilizando esse valor, sabendo que a massa molar do oxigênio é M = 32 g/mol e que o número de Avogadro é $N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas/mol, podemos determinar o número de moléculas (N) e a massa (m) de oxigênio por meio dos seguintes cálculos:

$$N = n.N_A = 0{,}041\ \text{mol}.6{,}02 \times 10^{23}\ \frac{\text{moléculas}}{\text{mol}}$$

$$\Rightarrow N = 2{,}5 \times 10^{22}\ \text{moléculas}$$

$$m = n.M = 0{,}041\ \text{mol}.32\ \frac{g}{mol} = 1{,}3\ g$$

Transformação de estado

O estado termodinâmico de um gás ideal é definido por três grandezas básicas: a pressão P, a temperatura T e o volume V. A figura 3 mostra um diagrama de superfície, P x V x T, de certa amostra de gás ideal. Qualquer estado de equilíbrio do gás é representado por um ponto sobre essa superfície. A curva 1-2, indicada sobre tal superfície, representa uma transformação de estado sofrida pelo gás. O estado inicial (1) é definido pelos valores P_1, V_1 e T_1, enquanto o estado final (2) pelos valores P_2, V_2 e T_2.

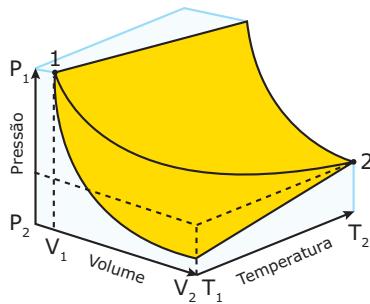



Figura 3: Transformação de estado sofrida por um gás ideal.

Independentemente da forma da curva 1-2, e também dos fatores que causaram a transformação no gás, podemos relacionar os estados 1 e 2 pela equação de estado de um gás ideal. Para isso, basta aplicar essa equação aos estados 1 e 2, e explicitar o produto n.R para esses estados, conforme indicado a seguir:

$$nR = \frac{P_1V_1}{T_1} \quad \text{e} \quad nR = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

Como a constante universal dos gases (R) e a quantidade de mols do gás (n) não variam, o produto n.R é constante, e o lado direito dessas equações é igual. Igualando esses termos, obtemos:

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

Também podemos comparar estados de gases ideais diferentes ou estados de um mesmo gás cuja massa varia durante a transformação (por exemplo, o ar em um pneu que está vazando). Nesses casos, em geral, a quantidade de gás no estado 1 (n_1) é diferente daquela no estado 2 (n_2). Por isso, devemos estabelecer uma relação entre os estados 1 e 2, considerando invariável apenas a constante R, e não mais o produto n.R, como fizemos antes. Explicitando R para os estados 1 e 2, obtemos:

$$R = \frac{P_1V_1}{n_1T_1} = \frac{P_2V_2}{n_2T_2}$$

As relações anteriores são úteis para resolver muitos problemas. Por exemplo, na figura 4, considere que a temperatura do ar no pneu seja igual a 20 °C (293 K) e que o manômetro marque 29 PSI[1]. De fato, a pressão real do ar no pneu é a soma da pressão manométrica com a pressão atmosférica (1 atm = 14,7 PSI), pois um manômetro mede a diferença entre a pressão real e a pressão atmosférica. A pressão real do ar no pneu, portanto, vale 43,7 PSI. Agora, usando as relações anteriores, vamos responder a duas perguntas referentes à situação mostrada na figura 4: (1) Qual será a pressão no pneu se a temperatura do ar subir para 40 °C (313 K)? (2) Que fração de ar deve ser retirada do pneu para a pressão voltar a seu valor inicial?

1. PSI significa libra-força por polegada quadrada – unidade de pressão no sistema inglês.

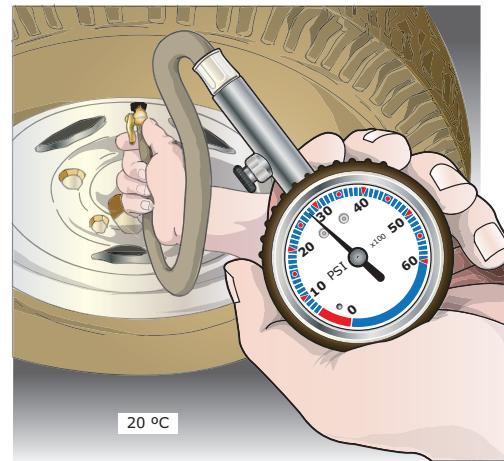



Figura 4: Medição da pressão manométrica do ar em um pneu.

Para responder à primeira pergunta, vamos relacionar o estado inicial (estado 1) com o estado do ar após o aquecimento (estado 2). Substituindo os valores conhecidos nessa relação, obtemos a seguinte pressão:

$$\frac{P_1V_1}{n_1T_1} = \frac{P_2V_2}{n_2T_2} \Rightarrow \frac{43{,}7.\cancel{V_1}}{\cancel{n_1}.293} = \frac{P_2.\cancel{V_2}}{\cancel{n_2}.313} \Rightarrow P_2 = 46{,}7 \text{ PSI}$$

Nesse cálculo, desprezamos possíveis vazamentos de ar e variações no volume do pneu. Por isso, n_1 e n_2 foram cancelados, o mesmo ocorrendo com V_1 e V_2.

Para responder à segunda pergunta, podemos relacionar o estado 2 com o estado do ar após a retirada de ar do pneu (estado 3). Assim, obtemos:

$$\frac{P_2V_2}{n_2T_2} = \frac{P_3V_3}{n_3T_3} \Rightarrow \frac{46{,}7.\cancel{V_2}}{n_2.\cancel{T_2}} = \frac{43{,}7.\cancel{V_3}}{n_3.\cancel{T_3}} \Rightarrow \frac{n_3}{n_2} = 0{,}94$$

Novamente, cancelamos os volumes. O valor da temperatura do ar mantém-se, praticamente, constante quando um pouco de ar é retirado do pneu. Por isso, as temperaturas T_2 e T_3 também foram canceladas. Assim, n_3 é 94% de n_2, ou seja, uma massa de ar igual a 6% da massa inicial deve ser retirada para a pressão voltar ao valor inicial.

Na próxima seção, abordaremos algumas transformações especiais. Antes, propomos uma questão para você refletir e apresentamos um exercício resolvido para reforçar as ideias estudadas até agora.

PARA REFLETIR

Por que a figura 1 sugere que a pressão crítica da amônia seja maior do que as pressões críticas do oxigênio e do nitrogênio?

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Um tanque de 1,0 m³, com oxigênio a 25 °C e 5,0 atm, está conectado por uma válvula a outro tanque com 5,0 kg de nitrogênio a 35°C e sujeito a uma pressão de 2,0 atm. A válvula é aberta e, pouco depois, o sistema atinge o equilíbrio térmico com a vizinhança, a 20 °C. Determinar o volume do segundo tanque e a pressão final de equilíbrio nos tanques.

Resolução:

A quantidade de gás no segundo tanque pode ser calculada a partir da massa do gás (5,0 x 10³ g) e da massa molar do nitrogênio (28 g/mol). Usando esses dados, obtemos:

$$n_{N_2} = \frac{5{,}0 \times 10^3\ g}{28\ g/mol} = 179\ mol$$

Substituindo esse valor e as condições iniciais de temperatura e pressão na equação de Clapeyron, obtemos o seguinte volume para o segundo tanque:

$$2{,}0\ atm.V_2 = 179\ mol.0{,}082\ \frac{atm.L}{mol.K}.308\ K$$

$$V_2 = 2{,}3 \times 10^3\ L = 2{,}3\ m^3$$

Agora, substituindo o volume do primeiro tanque e as condições iniciais de temperatura e pressão na equação de Clapeyron, encontramos a seguinte quantidade de oxigênio:

$$5{,}0\ atm.1{,}0 \times 10^3\ L = n_{O_2} 0{,}082\ \frac{atm.L}{mol.K}.298\ K$$

$$\Rightarrow n_{O_2} = 205\ mols$$

Após a abertura da válvula, os gases se misturam e atingem a temperatura ambiente (20 °C = 293 K) e uma pressão P. O volume total é a soma dos volumes dos tanques: 1,0 + 2,3 = 3,3 m³ (desprezando-se os volumes da tubulação e da válvula entre os tanques). A quantidade, em mols, de mistura é: 179 + 205 = 384 mols. Substituindo esses valores na equação de Clapeyron, obtemos:

$$P.3{,}3 \times 10^3\ L = 384\ mol.0{,}082\ \frac{atm.L}{mol.K}\ 293\ K$$

$$\Rightarrow P = 2{,}8\ atm$$

Comentário:

Em todas as condições de temperatura e pressão analisadas, o oxigênio e o nitrogênio comportaram-se como gases ideais. Por isso, a equação de Clapeyron pôde ser aplicada em todas as etapas da solução do problema.

TRANSFORMAÇÕES PARTICULARES NO ESTADO DE GASES IDEAIS

Nesta seção, vamos estudar três transformações de estado especiais, em que uma das variáveis de estado, o volume, a pressão ou a temperatura, de um gás ideal permanece constante.

Transformação isovolumétrica

O aquecimento ou o resfriamento de um gás contido em um tanque é uma transformação isovolumétrica. Nessa transformação, também chamada de isocórica ou isométrica, a pressão P e a temperatura T do gás variam, mas o volume V permanece constante. Usando a equação de estado de um gás ideal, podemos explicitar P em função de T, obtendo:

$$P = \frac{nR}{V}T = CT$$

O termo C = nR/V é constante (de valor positivo), pois o volume e a quantidade de gás (n) não variam, e R é a constante universal dos gases. Portanto, a equação P = CT representa uma reta ascendente que passa pela origem do diagrama P *versus* T, em que C é o coeficiente angular da reta. Em outras palavras, P varia proporcionalmente com T, de forma que, se o gás for aquecido a volume constante até que a temperatura absoluta T dobre de valor, a pressão P também irá dobrar, se T triplicar, P também irá triplicar, e assim por diante. Esse comportamento está ilustrado no primeiro gráfico da figura 5.

Substituindo a relação entre as escalas Kelvin (T) e Celsius (t), T = t + 273, na equação P = CT, obtemos: P = C(t + 273). Essa equação também representa uma reta de inclinação C, conforme está ilustrado no segundo gráfico da figura 5. Entretanto, agora, a reta não corta mais a origem do gráfico, mas sim o ponto de coordenadas (–273, 0).

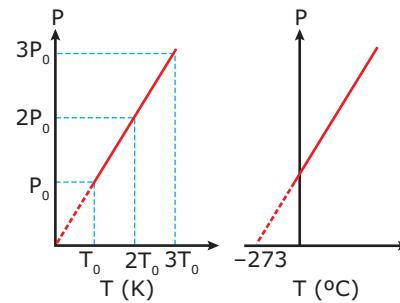



Figura 5: Pressão versus *temperatura em uma transformação isovolumétrica de um gás ideal.*

Transformação isobárica

Na transformação isobárica, o volume e a temperatura do gás variam, mas a pressão se mantém constante. Um processo isobárico muito usual ocorre quando um gás é aquecido em um cilindro com êmbolo. A pressão externa que atua sobre o gás possui um valor numericamente igual ao valor da pressão atmosférica somado com o valor da pressão exercida pelo peso do êmbolo. Antes do aquecimento,

o êmbolo está em repouso, e a pressão interna exercida pelo gás é igual à pressão externa. Quando o aquecimento se inicia, a temperatura do gás aumenta ligeiramente e, consequentemente, a pressão do gás também aumenta de um valor infinitesimal. Esse aumento é tão pequeno que mesmo um manômetro muito sensível não pode detectá-lo. Apesar de pequeno, esse desequilíbrio de pressão faz o êmbolo iniciar o movimento de subida. Por sua vez, essa expansão gera um alívio na pressão interna. O resultado é que a pressão interna permanece constante, com valor bem próximo ao valor da pressão externa, diferindo desta apenas por um valor infinitesimal.

Agora, vamos determinar a relação entre o volume V e a temperatura absoluta T para a transformação isobárica do gás. De acordo com a equação de estado de um gás ideal, V varia em função de T de acordo com:

$$V = \frac{nR}{P}T = CT$$

O termo C = nR/P é constante porque a pressão P e a quantidade de gás n não variam, e R é a constante universal dos gases. A equação V = CT representa uma reta que passa pela origem do diagrama V *versus* T, e C é o coeficiente angular dessa reta, ou seja, V e T são diretamente proporcionais, conforme está ilustrado no primeiro gráfico da figura 6. O segundo gráfico mostra a variação de V com a temperatura em graus Celsius.

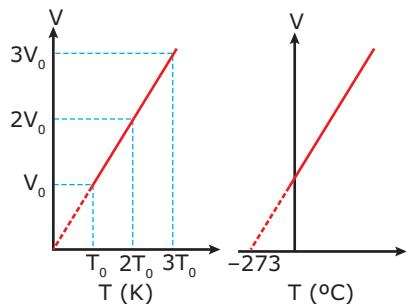



Figura 6: Gráfico volume versus *temperatura para uma transformação isobárica de um gás ideal.*

TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA

A figura 7 ilustra uma experiência para estudar uma transformação isotérmica de um gás, processo no qual a temperatura se mantém constante, enquanto a pressão e o volume variam. Em um tubo em U, existe ar aprisionado (gás ideal), pressurizado com a ajuda de uma coluna de mercúrio. Quando a pressão sobre o ar vale P_0 (1 atm, à pressão atmosférica), o volume é V_0. Adicionando mais mercúrio, a pressão aumenta para $2P_0$, e o volume diminui para $V_0/2$. Quando a pressão aumenta para $3P_0$, o volume diminui para $V_0/3$.

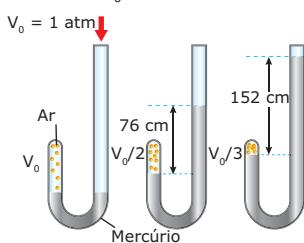



Figura 7: Montagem para estudar a transformação isotérmica.

O resultado dessa experiência sugere que, na transformação isotérmica, o volume V varia inversamente com a pressão P. Esse comportamento é previsto pela equação de estado de um gás ideal, conforme está indicado a seguir:

$$P = \frac{nRT}{V} = \frac{C}{V}$$

O termo C = nRT é constante, pois n, R e T são constantes. Assim, de acordo com P = C/V, a pressão P e o volume V são grandezas inversamente proporcionais. Podemos visualizar esse comportamento por meio do gráfico P *versus* V mostrado na figura 8, em que as duas curvas representam dois processos que ocorrem a temperaturas constantes e iguais a T e 2T. Essas curvas são denominadas isotérmicas. Na isotérmica mais interna (temperatura T), considere o estado definido pelo volume V_0 e pela pressão P_0. Observe que, se o gás expandir isotermicamente e o volume dobrar, a pressão ficará dividida por 2, se o volume quadruplicar, a pressão ficará dividida por 4, e assim por diante. Naturalmente, um comportamento de proporção inversa entre P e V também é verificado para a isotérmica de temperatura 2T.

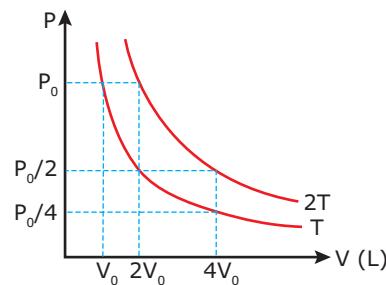
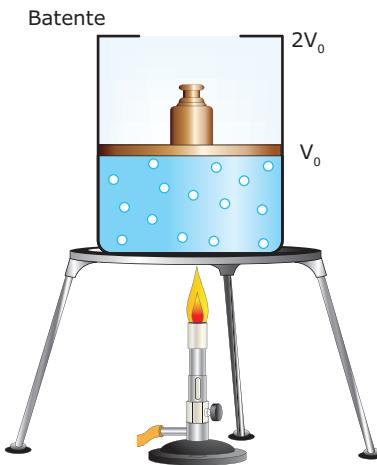



Figura 8: Gráfico pressão versus *volume para uma transformação isotérmica de um gás ideal.*

Outra informação importante sobre o gráfico P *versus* V é que as isotérmicas mais externas representam temperaturas maiores do que aquelas associadas às isotérmicas mais internas. Na figura 8, note que a temperatura referente à isotérmica externa é o dobro da temperatura referente à isotérmica interna. Esse fato pode ser justificado por meio da equação PV = nRT. Como as isotérmicas representam uma mesma amostra gasosa, n é uma constante. Assim, o produto PV é proporcional a T. Dessa forma, como esse produto vale P_0V_0 para a isotérmica interna e $2P_0V_0$ para a isotérmica externa, concluímos que a temperatura absoluta associada à curva externa é o dobro da temperatura absoluta referente à outra curva. Outra maneira de justificar essas temperaturas seria imaginar um estado qualquer sobre a isotérmica interna, digamos, o estado definido pelo volume $2V_0$ e pela pressão $P_0/2$. Agora, considere que o gás seja aquecido a volume constante até a pressão dobrar (estado definido por: $2V_0$, P_0). Como vimos, na transformação isovolumétrica, P é proporcional a T. Assim, concluímos que a temperatura absoluta realmente dobra de valor.

A seguir, apresentamos uma pergunta para você refletir e um exercício resolvido, ambos referentes às transformações gasosas abordadas nesta seção.

PARA REFLETIR

Você abriu a porta da geladeira, pegou o leite e fechou a porta, mas esqueceu de pegar a manteiga. Ao abrir a porta de novo, você faz bem mais força. Por que isso aconteceu?

EXERCÍCIO RESOLVIDO

02. Uma quantidade de 0,50 mol de um gás ideal, sob a pressão de $1,0 \times 10^5$ Pa, ocupa um volume de $8,3 \times 10^{-3}$ m³ em um cilindro com êmbolo, conforme mostra a figura seguinte. Em seguida, o gás é aquecido até que o êmbolo toque no batente. Quando o êmbolo toca no batente, o volume do gás é o dobro do inicial. A seguir, o gás é aquecido até 600 K. Construir o gráfico da pressão *versus* o volume para o aquecimento do gás, indicando os valores de pressão (P), volume (V) e temperatura (T) relevantes nesse processo.

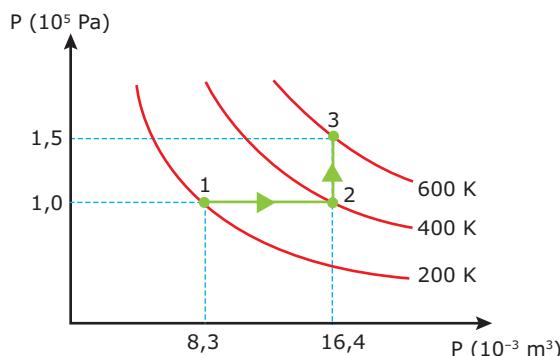
Resolução:

Primeiramente, vamos calcular o valor da temperatura inicial do gás (estado 1). Substituindo n = 0,50 mol, P_1 e V_1 na equação de estado, e usando R = 8,3 J/mol.K, obtemos:

$P_1V_1 = nRT_1 \Rightarrow 1,0 \times 10^5 \cdot 8,3 \times 10^{-3} = 0,50 \cdot 8,3T_1$

$\Rightarrow T_1 = 200$ K

Durante o movimento do êmbolo, a pressão se mantém constante, e a temperatura absoluta aumenta proporcionalmente com o volume. Como o volume dobra quando o êmbolo toca os batentes, nessa posição (estado 2), temos:

$P_2 = 1,0 \times 10^5$ Pa

$V_2 = 2V_1 = 16,4 \times 10^{-3}$ m³

$T_2 = 2T_1 = 400$ K

Na etapa final, o gás é aquecido a volume constante, e a pressão aumenta proporcionalmente com a temperatura absoluta. No estado final (estado 3), a temperatura do gás é $T_3 = 600$ K, e a pressão pode ser determinada da seguinte forma:

$$\frac{P_3}{T_3} = \frac{P_2}{T_2} \Rightarrow \frac{P_3}{600} = \frac{1,0 \times 10^5}{400} \Rightarrow P_2 = 1,5 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Por fim, com os valores obtidos, podemos construir o gráfico P *versus* V para essa sequência de transformações. Observe que as temperaturas dos estados 1, 2 e 3 foram indicadas por meio de três curvas de temperaturas constantes (isotérmicas).

TEORIA CINÉTICA DOS GASES

Nesta seção, vamos apresentar um modelo para predição do comportamento dos gases, baseado no movimento das moléculas do gás. Esse modelo, conhecido como teoria cinética dos gases, foi desenvolvido na segunda metade do século XIX e representa um marco no desenvolvimento da teoria atômica da matéria. Essa teoria fundamenta-se em quatro suposições:

1. As colisões das moléculas do gás contra as paredes do recipiente que contém o gás são elásticas.
2. O tempo de duração da colisão de uma molécula em uma parede é desprezível.
3. As moléculas do gás obedecem às leis do movimento de Newton.
4. O número de moléculas é muito grande, e, portanto, o gás pode ser analisado estatisticamente.

Usando essas ideias, pode-se deduzir a seguinte expressão para calcular a pressão de um gás monoatômico ideal em função da velocidade das moléculas.

$$P = \frac{Nm_0v^2}{3V}$$

De acordo com essa equação, pode-se concluir que a pressão do gás é proporcional à energia cinética de uma molécula ($m_0v^2/2$). Essa energia depende diretamente da temperatura absoluta do gás. Para demonstrar isso, primeiro, vamos calcular a energia total do gás (U), que é a soma da energia cinética de todas as moléculas (como o gás é ideal, as forças de interação entre as moléculas são desprezíveis e, assim, podemos desprezar a energia potencial do conjunto de moléculas), $U = Nm_0v^2/2$. Combinando essa expressão com a equação de P em função de V e com a equação de estado de um gás ideal, PV = nRT, obtemos a seguinte equação para a energia total:

$$U = \frac{3}{2}PV = \frac{3}{2}nRT$$

Se dividirmos essa equação por N, acharemos a expressão para a energia cinética de apenas uma molécula. Antes de fazer isso, é conveniente apresentar uma nova constante, definida pelo quociente entre a constante universal dos gases ideais e o número de Avogadro:

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8,314 \text{ J/mol.K}}{6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}} = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

k é a constante de Boltzmann, um número que desempenha um papel de grande relevância no estudo da Termodinâmica. Lembrando que a quantidade de gás pode ser calculada por $n = N/N_A$, podemos substituir essa expressão na equação de U. Dividindo tudo por N, obtemos a seguinte equação para energia cinética de uma molécula:

$$U = \frac{3}{2}kT$$

É mais apropriado se referir à grandeza U como sendo a energia cinética média por molécula, uma vez que nem todas as moléculas apresentam a mesma velocidade (v, na verdade, é a velocidade quadrática média das moléculas). Segundo a equação anterior, a energia cinética média de uma molécula é diretamente proporcional à temperatura absoluta do gás, independentemente de sua natureza. Isso nos permite tirar uma conclusão importante:

> Gases ideais diferentes, à mesma temperatura, possuem a mesma energia cinética média por molécula.

Esse fato, por sua vez, implica uma segunda conclusão importante:

> À mesma temperatura, quanto menor a massa molar do gás, maior a sua velocidade média molecular.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

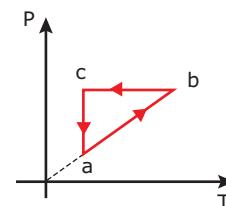
01. (UFV-MG–2008) Uma quantidade fixa de um gás real se comporta cada vez mais como um gás ideal se

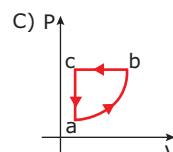
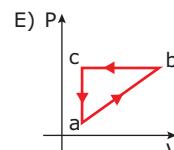
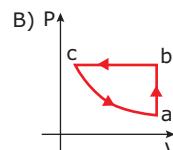
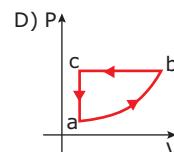
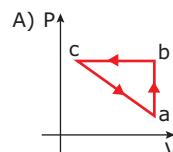
A) aumentarmos a sua pressão e a sua temperatura.

B) diminuirmos a sua pressão e a sua temperatura.

C) aumentarmos a sua pressão e diminuirmos a sua temperatura.

D) diminuirmos a sua pressão e aumentarmos a sua temperatura.

02. (Mackenzie-SP–2007) Um cilindro metálico de 41 litros contém argônio (massa de um mol = 40 g) sob pressão de 90 atm à temperatura de 27 °C. A massa de argônio no interior desse cilindro é de

Dado: R = 0,082 atm.L/(mol.K)

A) 10 kg. B) 9 kg. C) 8 kg. D) 7 kg. E) 6 kg.

03. (UFLA-MG–2006) Certa quantidade de um gás ideal está contida em um recipiente de paredes rígidas e volume V, inicialmente à temperatura T_1 = 400 K e exercendo uma pressão $P_1 = 1,0 \times 10^6$ N/m². Utiliza-se parte desse gás, de forma que a pressão baixe para $P_2 = 6,0 \times 10^5$ N/m² e a temperatura para T_2 = 300 K. Pode-se afirmar que a quantidade de gás utilizada foi de

A) 25%. B) 20%. C) 80%. D) 40%.

04. (UFC) Um gás ideal sofre o processo cíclico mostrado no diagrama P x T, conforme a figura a seguir. O ciclo é composto pelos processos termodinâmicos a → b, b → c e c → a.

Assinale, entre as alternativas a seguir, aquela que contém o diagrama P x V equivalente ao ciclo P x T.

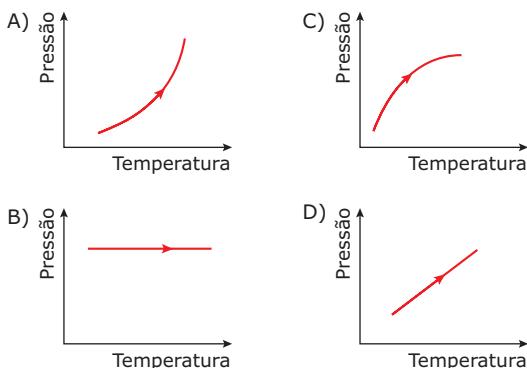
A)

D)

B)

E)

C)

FÍSICA

05. (CEFET-MG–2009) Pela teoria cinética dos gases, a pressão de um gás está relacionada à sua temperatura T, ao volume V por ele ocupado, à massa m, ao número N e à velocidade quadrática média v_M de suas moléculas. Um gás terá sua pressão aumentada se

A) N diminuir e m diminuir.
B) T diminuir e V aumentar.
C) V aumentar e N diminuir.
D) v_M diminuir e T aumentar.
E) m aumentar e v_M aumentar.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (UFMG–2006) Regina estaciona seu carro, movido a gás natural, ao Sol.

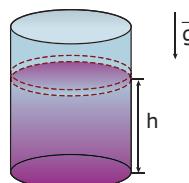
Considere que o gás no reservatório do carro se comporta como um gás ideal.

Assinale a alternativa cujo gráfico **MELHOR** representa a pressão em função da temperatura do gás na situação descrita.

A)

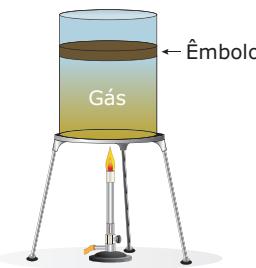
C)

B)

D)

02. (UEL-PR) Uma bolha de ar é formada junto ao fundo de um lago, a 5,0 m de profundidade, escapa e sobe à superfície. São dadas

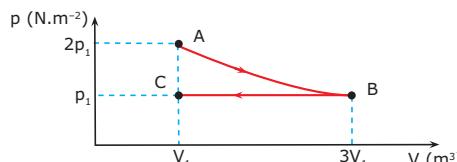
• pressão atmosférica = $1,0 \times 10^5$ N/m^2
• densidade da água = $1,0 \times 10^3$ kg/m^3

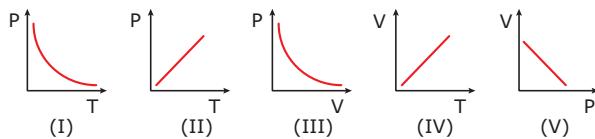
Considerando constante a temperatura da água, pode-se concluir que o volume da bolha, na subida,

A) permanece o mesmo.
B) aumenta 5%.
C) aumenta 10%.
D) aumenta 20%.
E) aumenta 50%.

03. (FUVEST-SP) O cilindro da figura a seguir é fechado por um êmbolo que pode deslizar sem atrito e está preenchido por uma certa quantidade de gás que pode ser considerado como ideal. À temperatura de 30 °C, a altura h na qual o êmbolo se encontra em equilíbrio vale 20 cm (ver figura; h se refere à superfície inferior do êmbolo).

Se, mantidas as demais características do sistema, a temperatura passar a ser 60 °C, o valor de h variará de, aproximadamente,

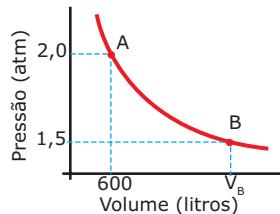
A) 5%.
B) 10%.
C) 20%.
D) 50%.
E) 100%.

04. (UFMG) A figura mostra um cilindro que contém um gás ideal, com um êmbolo livre para se mover. O cilindro está sendo aquecido. Pode-se afirmar que a relação que **MELHOR** descreve a transformação sofrida pelo gás é

A) p/V = constante.
B) p/T = constante.
C) V/T = constante.
D) pV = constante.

05. (FCMMG) Oxigênio foi introduzido em um botijão durante o inverno europeu a 0 °C e enviado ao Brasil para ser usado num hospital, cuja temperatura média é de 30 °C. Na nova situação, é **CORRETO** afirmar que

A) o oxigênio sofreu uma transformação isobárica.
B) a pressão do oxigênio dentro do botijão não se alterou.
C) o número de moléculas de oxigênio dentro do botijão aumentou.
D) o número de colisões das moléculas de oxigênio contra as paredes do botijão aumentou.

06. (UFV-MG) Dez mol de um gás perfeito sofrem uma transformação ABC, como mostrado no diagrama; p representa a pressão do gás, V o seu volume e T a temperatura absoluta, sendo T_A, T_B e T_C as temperaturas nos estados A, B e C, respectivamente. Pode-se afirmar **CORRETAMENTE** que

A) $T_B = T_C$.
B) $T_C = 6T_A$.
C) $T_A = 3T_B$.
D) $T_B = 2T_A$.
E) $2T_B = 3T_A$.

07. (EFOA-MG) Os gráficos a seguir ilustram transformações termodinâmicas de uma massa constante de um gás ideal, relacionando as variáveis de estado termodinâmico, pressão P, volume V e temperatura T.

Dos gráficos anteriores, aqueles que podem representar os processos isotérmico, isobárico e isovolumétrico são, respectivamente,

A) I, II e III.
B) II, III e IV.
C) III, IV e II.
D) I, III e V.
E) III, II e V.

08. (UFMG) Um mergulhador, na superfície de um lago onde a pressão é de 1,0 atm, enche um balão com ar e então desce a 10 m de profundidade. Ao chegar nessa profundidade, ele mede o volume do balão e vê que este foi reduzido a menos da metade. Considere que, dentro da água, uma variação de 10 m na profundidade produz uma variação de 1 atm de pressão.

Se T_S é a temperatura na superfície e T_P a temperatura a 10 m de profundidade, pode-se afirmar que

A) $T_S < T_P$.
B) $T_S = T_P$.
C) $T_S > T_P$.
D) não é possível fazer comparação entre as duas temperaturas com os dados fornecidos.

09. (UFU-MG–2009) O gráfico a seguir ilustra a pressão de um gás ideal em função do seu volume durante uma expansão isotérmica de um estado inicial A até um estado final B. Das alternativas a seguir, a que **CORRETAMENTE** representa o volume final V_B é:

A) 600 litros
B) 1 200 litros
C) 800 litros
D) 1 800 litros

10. Seja um mol de um gás ideal a uma temperatura de 400 K e à pressão atmosférica p_0. Esse gás passa por uma expansão isobárica até dobrar seu volume. Em seguida, esse gás passa por uma compressão isotérmica até voltar a seu volume original. Qual a pressão ao final dos dois processos?

A) $0,5p_0$
B) $1,0p_0$
C) $2,0p_0$
D) $5,0p_0$
E) $10,0p_0$

11. (PUC Minas–2009) Um balão de aniversário, cheio de gás hélio, solta-se da mão de uma criança, subindo até grandes altitudes. Durante a subida, é **CORRETO** afirmar:

A) O volume do balão diminui.
B) A pressão do gás no interior do balão aumenta.
C) O volume do balão aumenta.
D) O volume do balão permanece constante.

12. (FUVEST-SP–2009) Em um *freezer*, muitas vezes, é difícil repetir a abertura da porta, pouco tempo após ter sido fechada, devido à diminuição da pressão interna. Essa diminuição ocorre porque o ar que entra, à temperatura ambiente, é rapidamente resfriado até a temperatura de operação, em torno de –18 ºC. Considerando um *freezer* doméstico, de 280 L, bem vedado, em um ambiente a 27 ºC e pressão atmosférica P_0, a pressão interna poderia atingir o valor mínimo de

Observação: Considere que todo o ar no interior do *freezer*, no instante em que a porta é fechada, está à temperatura do ambiente.

A) 35% de P_0.
B) 50% de P_0.
C) 67% de P_0.
D) 85% de P_0.
E) 95% de P_0.

13. (UFLA-MG) De acordo com a teoria cinética dos gases, pode-se afirmar que

A) a energia cinética média das moléculas de um gás é proporcional à temperatura do gás em °C.
B) as moléculas de dois gases, de massas diferentes e a uma mesma temperatura absoluta T, apresentam energias cinéticas médias diferentes.
C) as moléculas de dois gases, de massas diferentes e a uma mesma temperatura absoluta T, apresentam a mesma energia cinética média.
D) a energia cinética média das moléculas de um gás depende da temperatura absoluta, da pressão, do volume e do tipo de moléculas.

14. (CESCEM-SP) Se a energia cinética média das moléculas de um gás aumentar e o volume do mesmo permanecer constante,

A) a pressão do gás aumentará e a sua temperatura aumentará.
B) a pressão permanecerá constante e a temperatura aumentará.
C) a pressão e a temperatura diminuirão.
D) a pressão diminuirá e a temperatura aumentará.
E) Todas as afirmações estão incorretas.

15. (UFVJM-MG–2009) Certa quantidade de gás ideal está confinada em um cilindro fechado provido de um êmbolo móvel. Sabendo que o gás está nas CNTP, faça o que se pede.

A) **DETERMINE** a temperatura do gás ao passar por uma transformação isocórica em que a pressão passe para 20% da inicial.
B) **DETERMINE** a pressão final do gás que, após a transformação isocórica, passa por uma transformação isotérmica, em que o volume se reduza a 1/4 do volume inicial.
C) **FAÇA** um diagrama P x V representando a condição inicial e as duas transformações dos itens A e B.

SEÇÃO ENEM

01. *Engenheiros alemães desenvolveram um equipamento para captar água potável da umidade do ar, em um processo energeticamente autônomo e descentralizado, que funciona utilizando unicamente fontes renováveis de energia. [...] Por mais seca que seja uma região, mesmo se for um deserto, o ar ambiente contém água. A umidade do ar é fornecida na forma de um percentual que expressa a relação entre a pressão parcial de vapor de água presente na mistura ar-água em relação à pressão de vaporização da água numa determinada temperatura.* [...]

Disponível em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/index.php>. Acesso em: 09 jun. 2009.

Considere um galpão de 2 000 m³, onde a temperatura é de 27 ºC, e a umidade relativa do ar é de 50%. O volume teórico de água que pode ser extraída desse ambiente vale

Dados:

Constante universal dos gases ideais: 8 J/mol.K
Massa molar da água: 18 g/mol
Densidade da água: 1 kg/L
Pressão de vaporização da água a 27 ºC = 3,6 x 10^3 Pa

A) 27 L.

B) 54 L.

C) 60 L.

D) 72 L.

E) 95 L.

02. Muitas marcas de xampus acondicionam o produto em embalagens plásticas dotadas com tampa de pressão. A figura a seguir ilustra uma cena não rara, que pode ocorrer quando uma pessoa volta de uma cidade praiana, como o Rio de Janeiro, para uma cidade de maior altitude, como Belo Horizonte. Ao abrir a mala, o viajante se surpreende ao ver que a tampa do frasco se abriu, derramando xampu sobre a roupa.

A cena descrita anteriormente ocorre porque, durante a viagem, o ar aprisionado no frasco tende a se

A) expandir devido ao aumento da pressão interna, e o derramamento de xampu poderia ser evitado se o frasco fosse comprimido um pouco antes de ser fechado.

B) expandir devido à redução da pressão externa, e o derramamento de xampu poderia ser evitado se o frasco fosse comprimido um pouco antes de ser fechado.

C) aquecer devido ao aumento de temperatura, e o derramamento de xampu poderia ser evitado se o frasco fosse colocado em um saco de plástico com gelo.

D) resfriar devido à diminuição da temperatura, e o derramamento de xampu poderia ser evitado se o frasco fosse colocado em um saco de plástico com água morna.

E) comprimir devido ao aumento da pressão externa, e o derramamento de xampu poderia ser evitado se o frasco fosse aquecido antes de ser fechado.

GABARITO

Fixação

01. D 02. E 03. B 04. B 05. E

Propostos

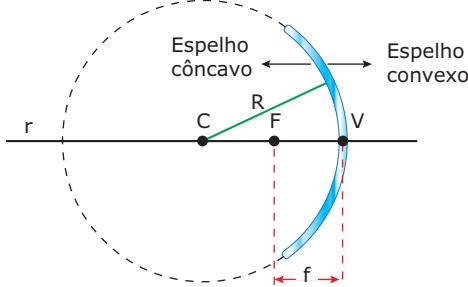
01. D 08. C
02. E 09. C
03. B 10. C
04. C 11. C
05. D 12. D
06. E 13. C
07. C 14. A

15. A) T = 54,6 K
B) P = 0,8 atm
C)

Seção Enem

01. A 02. B

FÍSICA

Espelhos esféricos

MÓDULO 03 | FRENTE C

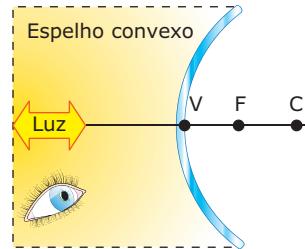
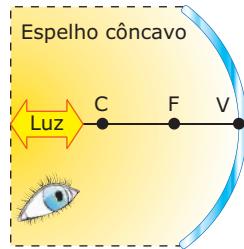
ESPELHO ESFÉRICO

Considere uma esfera oca espelhada interna e externamente. Se retirarmos uma fatia dessa esfera, obteremos uma calota esférica. A parte interna da calota é um espelho esférico côncavo, e a externa é um espelho esférico convexo. A figura a seguir mostra os elementos básicos de um espelho esférico.

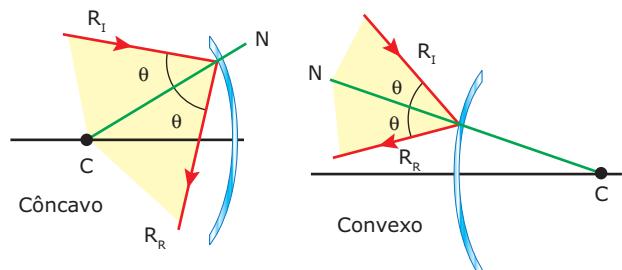
r: eixo principal do espelho;

C: centro de curvatura do espelho (centro da esfera que originou a calota);

V: vértice do espelho (ponto central da calota esférica);

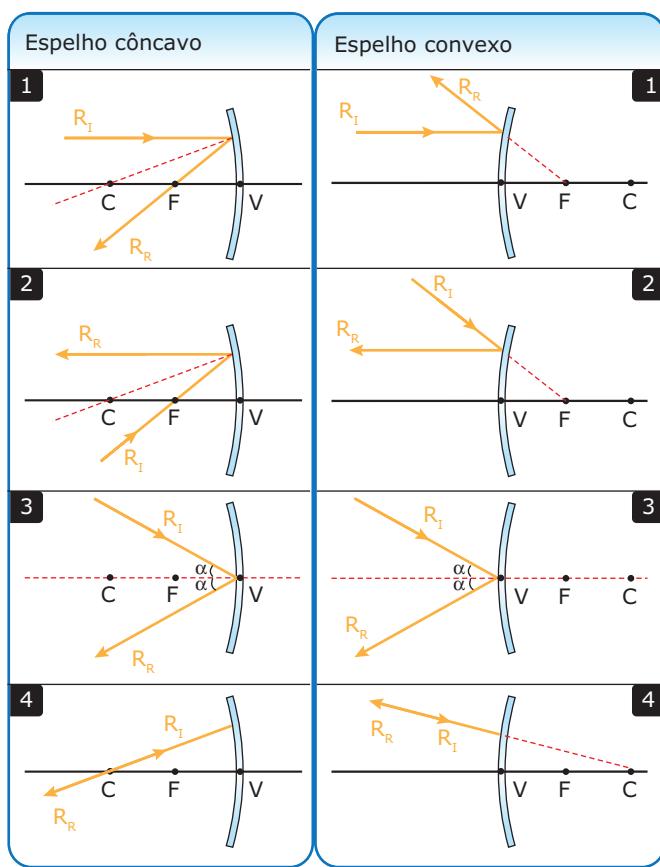
F: foco do espelho (ponto médio do segmento CV);

f = FV: distância focal do espelho;

R = CV: raio de curvatura do espelho.

O foco é o ponto médio do segmento CV, que é o raio de curvatura (R) do espelho. Assim, a distância focal (f) é metade desse segmento, ou seja:

$$f = \frac{R}{2}$$

Embora os espelhos côncavo e convexo apresentem os mesmos elementos, eles diferem totalmente em relação ao tipo de imagem que formam. Para perceber o motivo dessa diferença, analise as figuras a seguir, que representam os perfis de um espelho côncavo e de um espelho convexo e, também, os elementos que estão à frente dos espelhos (a luz que incide sobre os espelhos e é refletida por eles e o observador).

Observe, na primeira figura, que a luz pode passar pelo centro de curvatura e pelo foco do espelho côncavo. Tais pontos estão à frente do espelho. Já no espelho convexo, o centro de curvatura e o foco estão atrás do espelho. Nenhum raio luminoso, seja incidente ou refletido, passa por esses pontos, no espelho convexo.

As Leis da Reflexão são também obedecidas pelos espelhos côncavos e convexos. Como são esféricos, a normal (N), em qualquer ponto desses espelhos, deve passar pelo centro de curvatura. Veja as figuras a seguir.

Observe que o raio incidente (R_I), a normal (N) e o raio refletido (R_R) estão no mesmo plano e que os ângulos de incidência e de reflexão são iguais.

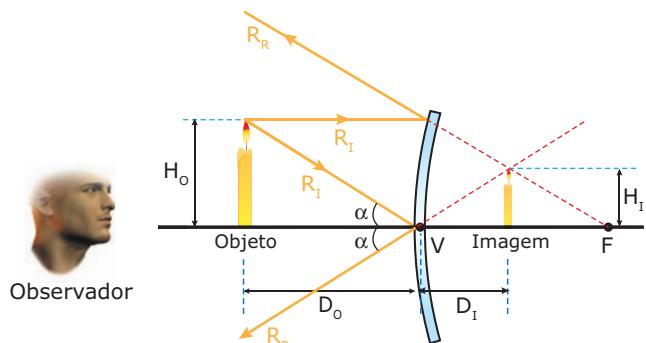
Existem quatro raios, chamados de raios notáveis, que você deve conhecer bem. São eles:

1. **O raio que incide paralelamente ao eixo principal** é refletido na direção do foco. No espelho côncavo, o raio refletido passa pelo foco e, no espelho convexo, é o prolongamento do raio refletido que passa pelo foco;

2. **O raio que incide na direção do foco** é refletido paralelamente ao eixo principal. No espelho côncavo, o raio incide passando pelo foco e, no convexo, o raio deve incidir na direção do foco, que está atrás do espelho;

3. **O raio que incide no vértice do espelho** é refletido para o outro lado do eixo principal, formando, com este, um ângulo igual ao ângulo de incidência (o eixo principal coincide com a normal);
4. **O raio que incide na direção do centro de curvatura** é refletido sobre si mesmo – os ângulos de incidência e de reflexão são iguais a zero (a normal passa pelo centro dos espelhos).

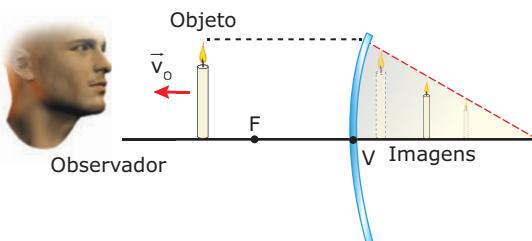
O quadro a seguir mostra o comportamento dos raios notáveis. Compare a forma como os raios são refletidos pelos dois espelhos.

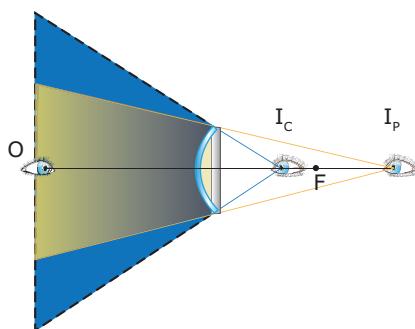
Observe no quadro anterior que as situações 1 e 2, no espelho côncavo e no espelho convexo, ilustram um princípio óptico importante: a **reversibilidade dos raios luminosos**. Veja, ainda, que, no espelho convexo, são os prolongamentos dos raios de luz que passam pelo foco, ou pelo centro do espelho.

Os raios de luz representados no quadro anterior apresentam aquele comportamento somente se os espelhos forem **parabólicos** e obedecerem às condições de Gauss. Os espelhos esféricos de pequena abertura (espelhos com curvatura pouco acentuada) têm comportamento semelhante ao dos espelhos parabólicos – dizemos que eles se aproximam das condições de Gauss. Por esse motivo, todos os espelhos do nosso livro serão considerados esféricos e de pequena abertura.

DETERMINAÇÃO GRÁFICA DAS IMAGENS

Em todas as situações apresentadas a seguir, vamos considerar o objeto retilíneo, vertical e com o "pé" (parte inferior do objeto) apoiado sobre o eixo principal. Para determinarmos a posição em que a imagem do objeto será formada, traçamos dois raios incidentes, quaisquer dos quatro notáveis, saindo da "cabeça" (parte superior) do objeto. Desenhamos, a seguir, os raios **refletidos** e, no encontro deles (ou dos seus prolongamentos), obtemos a imagem da "cabeça" do objeto. A imagem do "pé" estará apoiada sobre o eixo principal do espelho e na mesma vertical que a imagem da "cabeça".

Espelho convexo

O espelho convexo apresenta um único tipo de imagem, independentemente da posição do objeto em relação ao espelho. Veja a seguir.

Observe que os raios refletidos não se cruzam. Entretanto, prolongando cada um deles (linhas vermelhas), podemos determinar a posição em que a imagem da extremidade superior do objeto será formada, que será aquela em que se encontram esses prolongamentos. O observador, à frente do espelho, vê a imagem no local indicado, pois tem a sensação de que a luz saiu daquela posição. A imagem formada pelo espelho convexo é **sempre**

1. virtual (formada pelos prolongamentos dos raios refletidos);
2. direta (objeto e imagem de cabeças para cima);
3. mais perto do espelho do que o objeto ($D_I < D_O$);
4. de dimensões menores que o objeto ($H_I < H_O$; $L_I < L_O$).
5. localizada entre o foco e o vértice do espelho.

Se o objeto se aproxima (ou se afasta) do espelho, a imagem também se aproxima (ou se afasta) dele. Veja a seguir que, independentemente da posição do objeto, o raio que incide sobre o espelho paralelamente ao eixo principal será refletido de forma que seu prolongamento passe pelo foco.

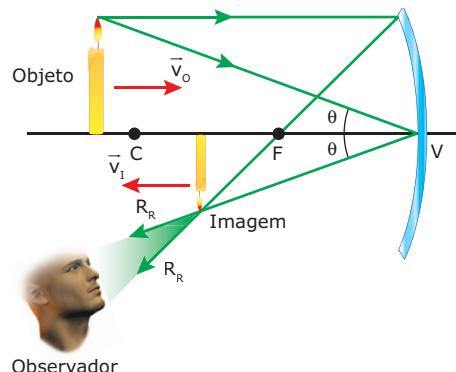
Assim, a imagem estará sempre dentro do "triângulo" destacado.

No caso de o objeto se colocar muito distante do espelho ("infinito"), a sua imagem estará praticamente sobre o foco.

Se a imagem formada pelo espelho convexo é sempre menor que o objeto, qual a sua utilidade? A resposta é simples: o espelho convexo fornece um campo visual maior, e, com isso, um número maior de objetos pode ser visto, simultaneamente, através dele. Daí a sua aplicação em garagens, lojas, supermercados, retrovisores de motos e automóveis, etc. Veja, a seguir, a comparação do campo visual de um espelho plano com o de um espelho convexo de mesmas dimensões, para um observador (O).

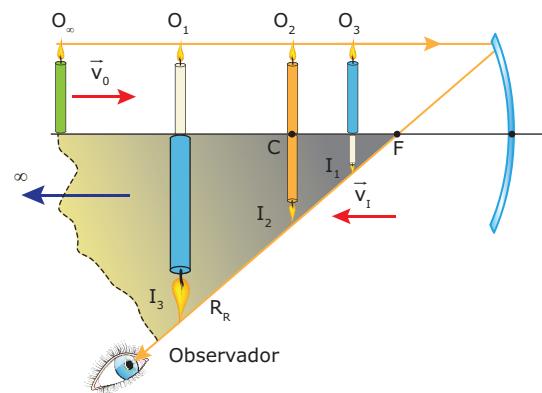
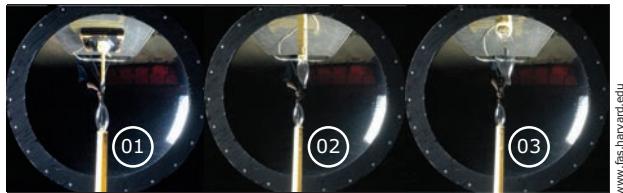
Na figura, I_C e I_P são as imagens do observador formadas pelos espelhos convexo e plano, respectivamente. O campo visual foi traçado a partir da imagem do observador e das extremidades dos espelhos. Compare agora os campos visuais dos dois espelhos.

Observe, na fotografia a seguir, a imagem da máquina que fotografou uma bola metálica de Natal (que se comporta como um espelho convexo). Veja a grande quantidade de objetos que estão sendo vistos por reflexão nessa pequena bola, que apresenta um campo visual enorme.

SXC

Espelho côncavo

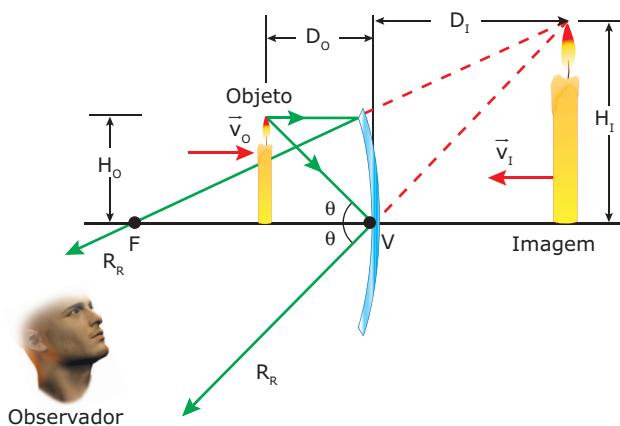
O espelho côncavo, ao contrário do convexo, pode formar diversos tipos de imagens, dependendo da posição do objeto em relação ao foco e ao centro de curvatura do espelho. Assim, a imagem pode ser real ou virtual e pode ser maior, menor ou de mesmas dimensões que o objeto. Veja os casos a seguir.

Objeto entre o infinito e o foco

$(\infty > D_o > f)$

Veja que, nesse caso, os próprios raios que saíram da "cabeça" do objeto, e que foram refletidos pelo espelho, se encontram. No ponto de cruzamento dos raios refletidos, ocorre a formação de uma **imagem real** da "cabeça" do objeto (a luz está chegando realmente a esse ponto). Os "pés" do objeto e da imagem do objeto estão sobre o eixo principal. Logo, a imagem é **invertida**, tanto vertical quanto lateralmente. Se houvesse uma tela (folha de papel, por exemplo) na posição da imagem, esta seria projetada nessa tela.

Uma característica importante de toda imagem **real** se refere aos deslocamentos da imagem em relação ao objeto. Ao contrário da imagem virtual, a imagem real se desloca no sentido oposto ao do objeto (em relação ao dispositivo óptico). Se o objeto se **aproxima** do espelho, a sua imagem se **afasta** deste e vice-versa. A figura a seguir mostra um objeto sendo deslocado sobre o eixo principal de um espelho, aproximando-se deste. Observe que a imagem do objeto afasta-se do espelho.

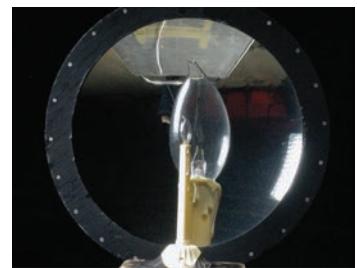
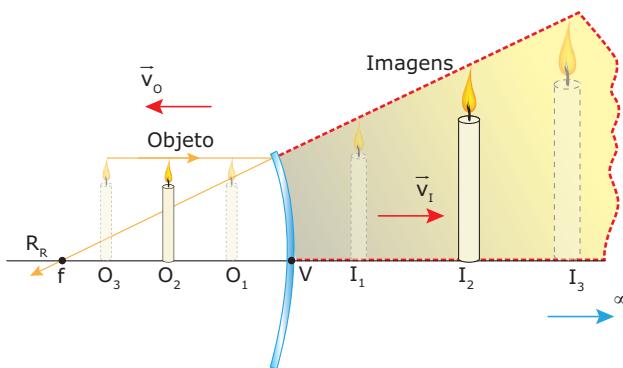
Em todas as situações representadas na figura anterior, a imagem do objeto é **real** e **invertida**. As únicas diferenças entre essas imagens se referem às suas dimensões e às suas respectivas localizações. Em qualquer um dos casos, a imagem estará localizada dentro do "triângulo" destacado.

Veja, a seguir, as fotografias das imagens mencionadas.

Veja, a seguir, as particularidades de cada imagem.

Posição do objeto	Natureza, posição e dimensões da imagem
Além de C (O_1), $D_O > 2f$	Imagem **real**, **invertida** e localizada entre C e F (I_1). $D_I < D_O$ e $H_I < H_O$
Sobre C (O_2), $D_O = 2f$	Imagem **real**, **invertida** e localizada sobre C (I_2). $D_I = D_O$ e $H_I = H_O$
Entre C e F (O_3), $2f > D_O > f$	Imagem **real**, **invertida** e localizada entre C e o infinito (I_3). $D_I > D_O$ e $H_I > H_O$

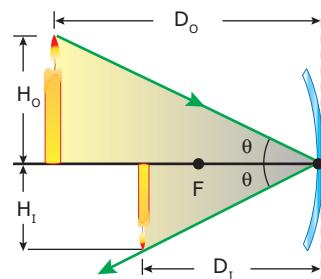
Observe que, à medida que o objeto se aproxima do **foco**, a posição da imagem **tende** a chegar ao infinito. Dois destaques importantes a respeito das imagens reais formadas pelo espelho côncavo são:

1. Os objetos O_1 e O_3 foram colocados de modo que se perceba o princípio da reversibilidade dos raios luminosos. Se um objeto for colocado na posição I_3, a sua imagem estará na posição de O_3. Se I_1 fosse um objeto, a sua imagem estaria na posição de O_1. Ou seja, para uma posição fixa de qualquer um dos elementos (objeto ou imagem), a posição do outro elemento independerá do fato de este elemento ser objeto ou imagem.

2. Uma situação prática importante acontece se o objeto estiver muito distante do espelho ($D_O >> 2f$). Nesse caso, dizemos que o objeto está no "infinito" (O_∞). Assim, a imagem formada é real, invertida, muito pequena e se localiza, praticamente, sobre o foco ($D_I \cong f$). Os telescópios refletores e algumas antenas receptoras de sinais de satélite são exemplos importantes que ilustram essa situação.

Objeto entre o foco e o vértice ($D_o < f$)

Veja que, nesse caso, os raios refletidos não se encontram. Os prolongamentos desses raios, porém, se cruzam atrás do espelho. No ponto desse cruzamento, é formada uma imagem do objeto. As suas características são:

1. imagem virtual (formada pelos prolongamentos dos raios refletidos);
2. imagem direta (objeto e imagem de cabeças para cima);
3. existe inversão lateral e de profundidade;
4. as dimensões (altura e largura) da imagem são maiores que as do objeto ($H_I > H_O$ e $L_I > L_O$);
5. a imagem está sempre atrás do espelho e mais distante deste que o objeto ($D_I > D_O$).

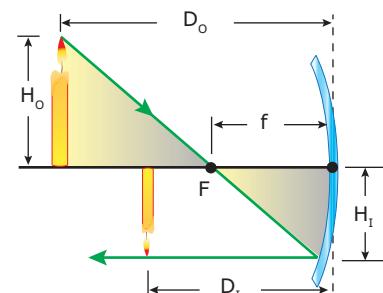
A situação apresentada tem uma importante aplicação prática no dia a dia. Nesse caso, o espelho é chamado de "espelho de aumento" e é muito usado para se obter uma imagem direta e maior do rosto de uma pessoa, por exemplo. Veja a seguir:

Nesse caso, se o objeto (próximo ao vértice) se afasta do espelho, aproximando-se cada vez mais do foco, a imagem também se afasta do espelho e tende a chegar ao infinito. Veja, a seguir, algumas posições possíveis para a imagem no espelho côncavo, quando o objeto se desloca entre o vértice e o foco. As imagens virtuais estão sempre dentro do "triângulo" destacado.

Veja uma comparação interessante. Analise as figuras anteriores, que mostram a região das possíveis imagens nos dois espelhos. As imagens virtuais, no espelho côncavo, vão do vértice ao infinito; e as imagens reais estão entre o foco e o infinito. Dessa forma, nenhuma imagem está localizada entre o foco e o vértice do espelho côncavo. No espelho convexo, ao contrário, as imagens estão, exclusivamente, localizadas entre o foco e o vértice.

Observe ainda que, se o objeto se aproxima do foco, seja vindo do centro de curvatura ou do vértice do espelho, a imagem do objeto tende ao infinito. Logo, se o objeto está **sobre o foco** do espelho côncavo, os raios de luz, refletidos pelo espelho, são paralelos entre si e não se cruzam na frente do espelho, e nem os seus prolongamentos atrás dele. Dessa forma, **não existe** imagem formada para essa posição do objeto. Alguns autores consideram que um objeto sobre o foco de um espelho côncavo tem a sua imagem formada no infinito. Nesse caso, ela é chamada de imagem **imprópria**.

Antes de finalizar a parte gráfica da determinação das imagens, vamos fazer uma constatação importante. Para objetos reais (colocados à frente dos espelhos), toda imagem **real** é **invertida** e qualquer imagem **virtual** é **direta**.

DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DA IMAGEM

Vamos, agora, deduzir relações entre as grandezas H_O e H_I (alturas do objeto e da imagem), D_O e D_I (distâncias do objeto e da imagem ao vértice do espelho) e f (distância focal do espelho). Para isso, vamos considerar a figura a seguir. Lembre-se de que o raio de luz que incide sobre o vértice do espelho é refletido, formando, com o eixo principal, um ângulo igual ao ângulo de incidência. Uma vez que os dois triângulos destacados são semelhantes, podemos escrever:

$$A = \frac{H_I}{H_O} = \frac{|D_I|}{D_O}$$

Essa relação permite calcular a ampliação (A) fornecida pelo espelho. Observe a proporcionalidade entre as alturas da imagem e do objeto e as respectivas distâncias da imagem e do objeto ao espelho. Assim, se a distância da imagem ao espelho (D_I) é, por exemplo, o triplo da distância do objeto ao espelho (D_O), a altura da imagem (H_I) é também o triplo da altura do objeto (H_O). Da relação anterior, temos que:

- se $A > 1$, a imagem é **maior** do que o objeto e está **mais distante** do espelho do que o objeto.
- se $A = 1$, a imagem é do **mesmo tamanho** que o objeto e está à **mesma distância** do espelho que o objeto.
- se $A < 1$, a imagem é **menor** do que o objeto e está **mais próxima** do espelho do que o objeto.

Outra expressão importante pode ser deduzida a partir da figura a seguir. Ela representa a mesma situação anterior, porém a imagem foi obtida a partir de um raio de luz que passa pelo foco do espelho.

Para um espelho de pequena abertura (aproximação de Gauss), o arco do espelho é próximo de um segmento de reta. Nesse caso, os dois triângulos destacados são semelhantes. Neles, temos:

$$\frac{H_I}{H_O} = \frac{f}{(D_O - f)}$$

$$\text{Como: } \frac{H_I}{H_O} = \frac{D_I}{D_O} \Rightarrow \frac{D_I}{D_O} = \frac{f}{(D_O - f)}$$

$$\Rightarrow D_I.(D_O - f) = f.D_O \quad \Rightarrow \quad D_I.D_O - f.D_I = f.D_O$$

$$\Rightarrow D_I.D_O = f.D_I + f.D_O$$

Dividindo por ($D_I.D_O.f$), temos:

$$\frac{D_I.D_O}{D_I.D_O.f} = \frac{f.D_I}{D_I.D_O.f} + \frac{f.D_O}{D_I.D_O.f} \Rightarrow \boxed{\frac{1}{f} = \frac{1}{D_O} = \frac{1}{D_I}}$$

A expressão anterior é conhecida como equação de Gauss ou equação dos pontos conjugados. Para usá-la, devemos considerar os sinais das grandezas envolvidas, quando forem dados do exercício (informações fornecidas), de acordo com o estabelecido a seguir:

- Em qualquer situação → $D_O > 0$ (positivo);
- Espelho côncavo → $f > 0$ (positivo);
- Espelho convexo → $f < 0$ (negativo);
- Imagem real → $D_I > 0$ (positivo);
- Imagem virtual → $D_I < 0$ (negativo).

OBSERVAÇÃO

Na equação de Gauss, uma das grandezas será, necessariamente, aquela a ser encontrada (incógnita). Para essa, **não** devemos colocar sinal prévio na equação. Agindo dessa forma, o sinal associado à incógnita será obtido pelo resultado.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

01. Um objeto de 10 cm de altura é colocado a 60 cm do vértice de um espelho côncavo, de raio de curvatura igual a 80 cm. Determinar a posição, a natureza e o tamanho da imagem fornecida pelo espelho.

Resolução:

Como f = R/2, temos: f = 80 cm/2 ⇒ f = 40 cm (espelho côncavo tem distância focal positiva).

Usando a equação de Gauss, temos:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_O} + \frac{1}{D_I} \Rightarrow \frac{1}{40} = \frac{1}{60} + \frac{1}{D_I} \Rightarrow D_I = 120\,\text{cm}$$

Observe que o resultado obtido para D_I foi positivo. Agora, utilizando a equação da ampliação, temos:

$$\frac{H_I}{H_O} = \frac{|D_I|}{D_O} \Rightarrow \frac{H_I}{10} = \frac{120}{60} \Rightarrow H_I = 20\,\text{cm}$$

De acordo com os resultados anteriores, conclui-se que a imagem está além do centro de curvatura (D_I = 120 cm). Como D_I é positivo, a imagem é real e invertida e, conforme o resultado da ampliação, a altura da imagem é 20 cm. Observe que a altura da imagem é o dobro da altura do objeto.

02. A distância do Sol à Terra é, aproximadamente, 200 vezes o diâmetro do Sol. Este é observado através de um espelho côncavo, cuja distância focal é 30 m. Determinar a altura (diâmetro) da imagem obtida pelo espelho.

Resolução:

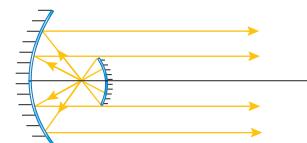
Uma vez que o Sol está muito distante, a sua imagem se forma praticamente sobre o foco do espelho. Assim, $D_I \cong f$ = 30 m. Conforme o enunciado, $D_O = 200H_O$. Levando tais informações para a equação da ampliação, temos:

$$\frac{H_I}{H_O} = \frac{|D_I|}{D_O} \Rightarrow \frac{H_I}{H_O} = \frac{3\,000\,\text{cm}}{200.H_O} \Rightarrow H_I = 15\,\text{cm}$$

O resultado mostra que, mesmo para objetos muito distantes, a imagem pode não ser pontual. Ela, porém, tem tamanho desprezível em relação ao objeto.

03. Um objeto é colocado 30 cm à frente de um espelho esférico. A imagem formada é virtual e sua altura é o dobro da altura do objeto. Determinar o tipo de espelho usado e o seu raio de curvatura.

Resolução:

Se $H_I = 2H_O$ ⇒ $|D_I|$ = 2.30 = 60 cm. Como a imagem é virtual, D_I deve ser negativo. Assim, D_I = –60 cm. Utilizando a equação de Gauss:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_O} + \frac{1}{D_I} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{30} + \frac{1}{-60} \Rightarrow f = 60\ \text{cm}$$

f = R/2 ⇒ R = 2f = 2.60 = 120 cm ⇒ R = 120 cm

Veja, pelo resultado, que a distância focal é positiva. Assim, o espelho usado é côncavo e o seu raio é R = 120 cm.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (UFV-MG) Um farol de automóvel consiste em um filamento luminoso colocado entre dois espelhos esféricos côncavos de mesmo eixo, voltados um para o outro e de tamanhos diferentes, de modo que todos os raios oriundos do filamento se refletem no espelho maior e se projetam paralelos, conforme a figura a seguir.

A posição **CORRETA** do filamento é

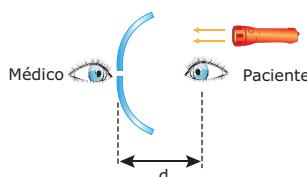
A) no centro de curvatura do espelho menor e no foco do espelho maior.

B) no vértice do espelho menor e no centro de curvatura do espelho maior.

C) no foco de ambos os espelhos.

D) no centro de curvatura de ambos os espelhos.

E) no foco do espelho menor e no centro de curvatura do espelho maior.

02. (UFF-RJ–2010) A figura mostra um objeto e sua imagem produzida por um espelho esférico.

Escolha a alternativa que identifica **CORRETAMENTE** o tipo do espelho que produziu a imagem e a posição do objeto em relação a esse espelho.

A) O espelho é convexo, e o objeto está a uma distância maior que o raio do espelho.

B) O espelho é côncavo, e o objeto está posicionado entre o foco e o vértice do espelho.

C) O espelho é côncavo, e o objeto está posicionado a uma distância maior que o raio do espelho.

D) O espelho é côncavo, e o objeto está posicionado entre o centro e o foco do espelho.

E) O espelho é convexo, e o objeto está posicionado a uma distância menor que o raio do espelho.

03. (UFJF-MG) Na entrada de um *shopping*, é colocado um grande espelho convexo de distância focal 40 cm. Uma criança se assusta quando vê sua imagem refletida no espelho. Considerando-se que, nesse momento, a criança se encontra a 1,2 m do vértice do espelho, podemos afirmar que ela vê sua imagem nesse espelho

A) três vezes maior.

B) duas vezes menor.

C) quatro vezes maior.

D) quatro vezes menor.

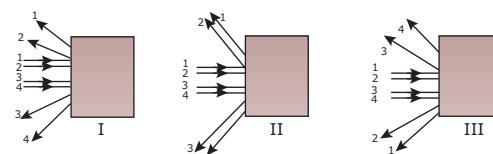
E) três vezes menor.

04. (FCMMG) O oftalmoscópio é um aparelho destinado ao exame do fundo do olho. O médico observa o olho do paciente através de um orifício situado no centro de um espelho côncavo, enquanto uma pequena lanterna ilumina o olho através da luz refletida no espelho, como mostra a figura a seguir.

O espelho côncavo possui uma distância focal f e um raio de curvatura R. Para que a luz da lanterna ilumine melhor o olho do paciente, este deve estar a uma distância d tal que

A) R > d > f.

B) d = R.

C) d < f.

D) d = f.

05. (UFTM-MG) Uma estudante, em sua casa, observa um vaso de vidro transparente esférico vazio e, nele, vê duas imagens da mesma janela, localizada à frente do vaso. Isso ocorre porque as superfícies do vaso funcionam como espelhos esféricos. A externa, mais próxima da janela, equivale a um espelho convexo; a interna, mais afastada, equivale a um espelho côncavo. Pode-se afirmar que essas imagens estão localizadas

A) fora do vaso e são, ambas, direitas.

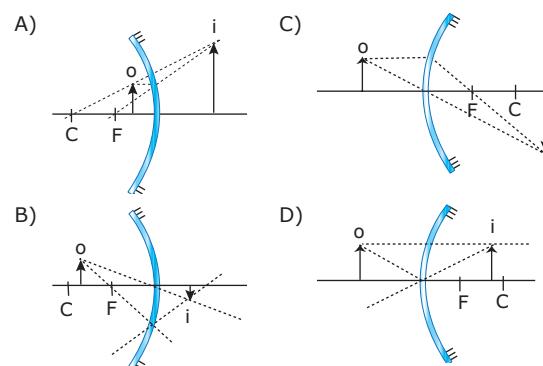
B) fora do vaso e são, ambas, invertidas.

C) dentro do vaso e são, ambas, direitas.

D) dentro do vaso e são, ambas, invertidas.

E) dentro do vaso, uma é direita e a outra é invertida.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (UFMG) Em cada uma das situações a seguir, estão representados quatro raios de luz que são refletidos por espelhos ocultos por placas retangulares.

As formas dos espelhos são:

Observando a trajetória dos raios incidentes e refletidos, conclui-se que, em I, II e III, estão colocados, respectivamente, os espelhos

A) côncavo, planos e convexo.

B) planos, côncavo e convexo.

C) convexo, côncavo e planos.

D) convexo, planos e côncavo.

E) côncavo, convexo e planos.

02. (UFU-MG) Considere os espelhos côncavos e convexos e os seus respectivos focos (F) e centros (C) desenhados nos itens a seguir. Assinale a alternativa que representa **CORRETAMENTE** o objeto real (o) e a sua imagem (i) formada.

03. (UFRN–2006) Deodora, aluna da 4ª série do Ensino Fundamental, ficou confusa na feira de ciências de sua escola, ao observar a imagem de um boneco em dois espelhos esféricos. Ela notou que, com o boneco colocado a uma mesma distância do vértice dos espelhos, suas imagens produzidas por esses espelhos apresentavam tamanhos diferentes, conforme mostrado nas figuras 1 e 2, reproduzidas a seguir.

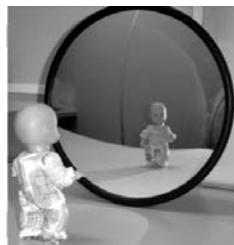



Figura 1

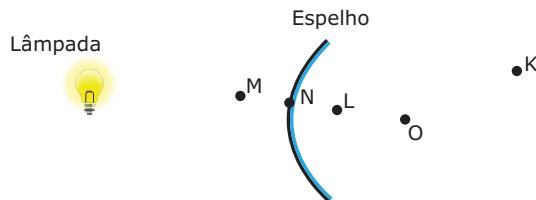
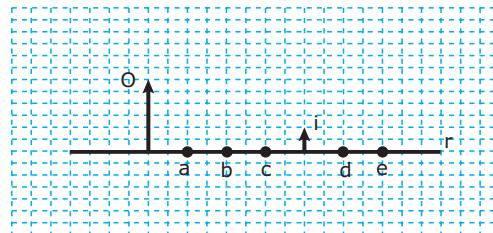



Figura 2

Observando-se as duas imagens, é **CORRETO** afirmar que

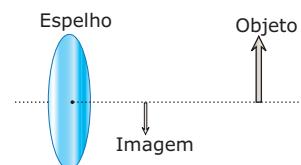
A) o espelho da figura 1 é côncavo, o da figura 2 é convexo, e o boneco está entre o foco e o vértice desse espelho.
B) o espelho da figura 1 é convexo, o da figura 2 é côncavo, e o boneco está entre o centro de curvatura e o foco desse espelho.
C) o espelho da figura 1 é convexo, o da figura 2 é côncavo, e o boneco está entre o foco e o vértice desse espelho.
D) o espelho da figura 1 é côncavo, o da figura 2 é convexo, e o boneco está entre o centro de curvatura e o foco desse espelho.

04. (UFMG) Uma pequena lâmpada está na frente de um espelho esférico, convexo, como mostrado na figura.

O centro de curvatura do espelho está no ponto O. Nesse caso, o ponto em que, mais provavelmente, a imagem da lâmpada será formada é o

A) K.
B) L.
C) M.
D) N.

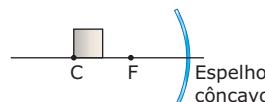
05. (UFMG) Com um espelho côncavo, pode-se formar, de um objeto real, uma imagem não invertida e que seja

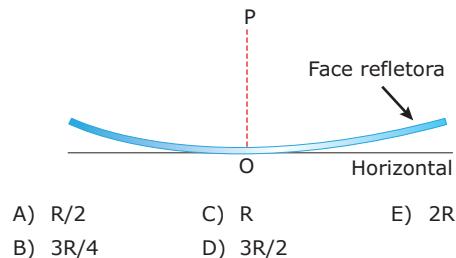
A) real e maior do que o objeto.
B) real e do tamanho do objeto.
C) real e menor do que o objeto.
D) virtual e maior do que o objeto.
E) virtual e menor do que o objeto.

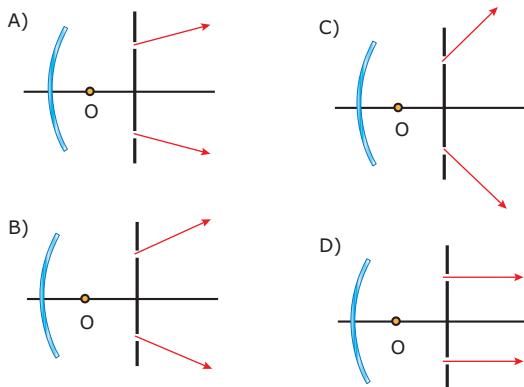
06. (UFAL) O esquema a seguir representa o eixo principal (r) de um espelho esférico, um objeto real O e sua imagem i conjugada pelo espelho.

Considerando os pontos a, b, c, d, e, é **CORRETO** afirmar que o espelho é

A) côncavo e seu vértice se encontra em d.
B) côncavo e seu foco se encontra em c.
C) côncavo e seu centro se encontra em e.
D) convexo e seu vértice se encontra em c.
E) convexo e seu foco se encontra em e.

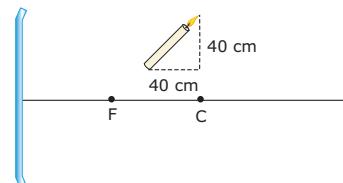
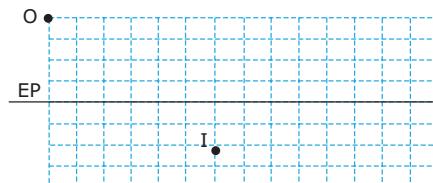
07. (CEFET-MG–2008) A distância entre um espelho côncavo e um anteparo é de 4,0 m. Para projetar a imagem de um objeto ampliada de 9 vezes sobre a tela, a distância focal do espelho, em metros, deve ser de

A) 0,40 m.
B) 0,45 m.
C) 0,50 m.
D) 0,55 m.
E) 0,60 m.

08. (Mackenzie-SP) Um objeto real, colocado perpendicularmente ao eixo principal de um espelho esférico, tem imagem como mostra a figura a seguir.

Pelas características da imagem, podemos afirmar que o espelho é

A) convexo e sua imagem é virtual.
B) convexo e sua imagem é real.
C) côncavo e a distância do objeto ao espelho é menor que o raio de curvatura do espelho, mas maior que sua distância focal.
D) côncavo e a distância do objeto ao espelho é maior que seu raio de curvatura.
E) côncavo e a distância do objeto ao espelho é menor que a distância focal do espelho.

09. (OBF) Um quadrado está localizado sobre o eixo principal de um espelho esférico côncavo, como ilustrado na figura a seguir. Sabe-se que o vértice inferior esquerdo do quadrado está localizado exatamente sobre o centro de curvatura do espelho. Pode-se afirmar que a imagem do quadrado tem forma de um

A) quadrado.
B) triângulo.
C) retângulo.
D) trapézio.
E) losango.

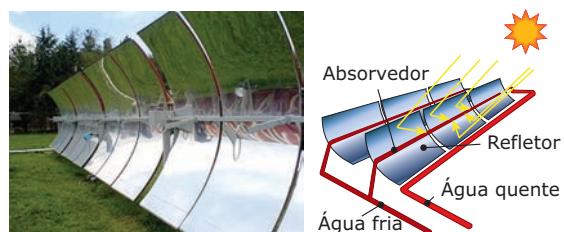
10. (UFC–2010) A figura a seguir mostra um espelho esférico côncavo de raio de curvatura R, apoiado sobre a horizontal, com a face refletora voltada para cima. A reta tracejada vertical OP passa sobre o ponto correspondente ao centro do espelho esférico. Determine a distância y, acima do ponto O e ao longo da reta OP, para a qual ocorrerá maior incidência de luz solar refletida pelo espelho, suposta de incidência vertical. Considere o espelho esférico com pequeno ângulo de abertura, de modo que os raios incidentes são paralelos e próximos ao seu eixo principal. Assinale a alternativa que apresenta **CORRETAMENTE** essa distância.

A) R/2
B) 3R/4
C) R
D) 3R/2
E) 2R

11. (UFMG / Adaptado) Um objeto luminoso (O) está colocado a 10 cm de distância de um espelho côncavo, cuja distância focal é igual a 20 cm. Uma folha de papel, com dois pequenos furos, é colocada sobre o foco do espelho, perpendicularmente ao seu eixo. Os raios luminosos, refletidos pelo espelho, saem pelos furos da folha de papel de acordo com a alternativa:

12. (FCMMG) Um automóvel tem três espelhos: um plano, usado no retrovisor interno; um convexo, usado no retrovisor externo; um côncavo, usado para ampliar imagens do rosto do passageiro dianteiro. A imagem formada por cada um desses três espelhos é, respectivamente,

A) real, virtual e real.
B) virtual, real e real.
C) virtual, virtual e real.
D) virtual, virtual e virtual.

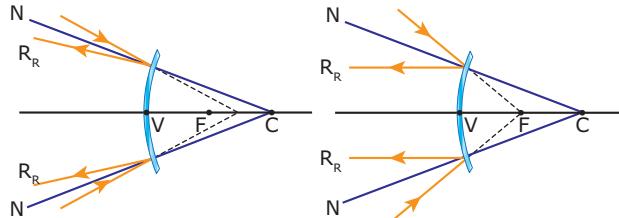
13. (Mackenzie-SP) A imagem de um objeto que está a 40 cm de um espelho esférico côncavo tem a mesma altura do objeto. Colocando o objeto à grande distância do espelho, a sua imagem estará a

A) 60 cm do espelho.
B) 50 cm do espelho.
C) 40 cm do espelho.
D) 30 cm do espelho.
E) 20 cm do espelho.

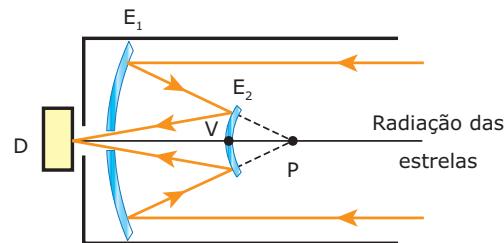
14. Uma vela de $40\sqrt{2}$ cm de comprimento é colocada, inclinada de 45°, à frente de um espelho côncavo que obedece às condições de Gauss e cuja distância focal é igual a 60 cm. A chama da vela está acima do centro de curvatura e o "pé" da vela está a 20 cm de distância do eixo principal (EP), conforme a figura a seguir. **DETERMINE** o comprimento da imagem da vela.

15. Um objeto luminoso (O) tem sua imagem (I) formada por um espelho côncavo ideal de eixo principal (EP), conforme a figura adiante. Considere que os quadriculados tenham lados iguais e que o espelho possa ser desenhado como se fosse plano na região na qual recebe luz. **DETERMINE** graficamente, na figura a seguir, as posições do espelho e do seu foco. **JUSTIFIQUE** sua resposta.

SEÇÃO ENEM

01. A energia solar, cada vez mais, vem sendo utilizada para substituir a energia obtida pela queima de combustíveis fósseis. Uma de suas aplicações está no uso de concentradores solares, dispositivos utilizados para o aquecimento de água e de óleo que posteriormente podem ser aproveitados para diversas finalidades. Um concentrador solar típico capta a energia solar que incide em um espelho cilíndrico côncavo e a concentra sobre um cano, no qual há água ou óleo. Considere que tal espelho seja esférico. A fotografia e o esquema de funcionamento do dispositivo estão mostrados a seguir. Observe que a energia solar que atinge o concentrador é refletida pelo espelho e se dirige para o cano absorvedor, por onde passam a água ou o óleo a serem aquecidos.

Preocupada com o aquecimento global, a diretoria de um grande clube esportivo decidiu instalar concentradores solares para aquecer a água de suas piscinas. Os projetos apresentados ofereciam duas alternativas:

1. espelhos concentradores com vários painéis, totalizando 50 m de comprimento, possuindo distância focal de 2,0 m e canos transportadores de água com 1,0 cm de diâmetro;
2. espelhos concentradores com vários painéis, totalizando 50 m de comprimento, possuindo distância focal de 4,0 m e canos transportadores de água com 1,0 cm de diâmetro;

Considere que a distância do Sol à Terra seja 200 vezes o diâmetro do Sol, que a vazão de água pelos canos seja sempre constante e que os concentradores têm eficiência de 100%. Nas duas propostas apresentadas, há um dispositivo para girar o concentrador, de modo que a energia solar sempre chegue aos espelhos na direção do eixo principal, e os concentradores têm a mesma seção reta retangular, isto é, eles recebem a mesma quantidade de energia solar a cada instante.

Com o objetivo de conseguir o melhor aproveitamento da energia solar, de modo que a água seja aquecida o mais rapidamente possível, a diretoria do clube deve optar

A) pela alternativa 1 e exigir que o cano absorvedor fique a 1,0 m da linha central do concentrador.

B) pela alternativa 1 e exigir que o cano absorvedor fique a 2,0 m da linha central do concentrador.

C) pela alternativa 2 e exigir que o cano absorvedor fique a 1,0 m da linha central do concentrador.

D) pela alternativa 2 e exigir que o cano absorvedor fique a 2,0 m da linha central do concentrador.

E) por qualquer das alternativas, desde que o cano absorvedor fique a 1,0 m e a 2,0 m da linha central do concentrador, respectivamente, nas propostas 1 e 2.

02. De acordo com a óptica geométrica, quando uma imagem é formada pelo encontro de raios refletidos, ela é real. Caso seja formada por cruzamento de prolongamentos de raios refletidos, ela será virtual. As figuras a seguir mostram dois raios de luz que incidem em um espelho, de pequena abertura, convexo e de vértice V, centro de curvatura C e foco F. Como a normal N, no ponto de incidência, deve passar pelo centro C, os raios incidentes e refletidos obedecem à 2ª Lei da Reflexão (ângulos de incidência e reflexão congruentes).

O primeiro telescópio refletor – que usava espelhos em vez de lentes – foi inventado, em 1668, por Isaac Newton. Os grandes telescópios modernos possuem um grande espelho côncavo (E_1) capaz de captar a luz e os raios infravermelhos e ultravioletas emitidos por estrelas distantes. Esse espelho, que possui uma pequena abertura na parte central, reflete a radiação para outro espelho convexo (E_2), menor, que finalmente vai produzir a imagem que será gravada nos detectores de radiação (D). A figura a seguir mostra os raios que incidem num telescópio com tais características. Este é o princípio básico de funcionamento do Hubble, o mais famoso dos telescópios atuais.

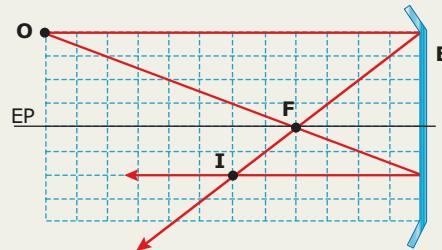
Como o astro observado está muito distante, a radiação emitida por ele chega ao telescópio paralelamente ao eixo comum dos espelhos. Observe que a luz refletida pelo espelho E_1 se dirige para o ponto P do espelho E_2. Considere que V e f sejam, respectivamente, o vértice e a distância focal do espelho secundário (E_2). Dessa forma, a imagem formada nos detectores de radiação (D) será

A) real, e, para que isso aconteça, VP deve ser menor que f.

B) real, e, para que isso aconteça, VP deve ser maior que f.

C) virtual, e, para que isso aconteça, VP deve ser maior que f.

D) virtual, e, para que isso aconteça, VP deve ser menor que f.

E) real, se VP for maior que f e virtual, se VP for menor que f.

GABARITO

Fixação

01. A 02. D 03. D 04. D 05. E

Propostos

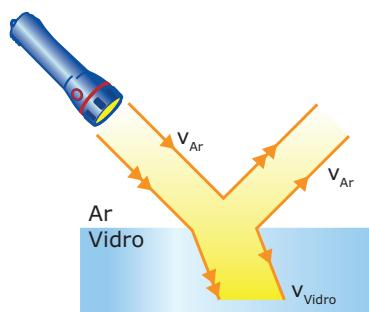
01. D 04. B 07. A 10. A 13. E
02. A 05. D 08. D 11. A 14. 120 cm
03. C 06. D 09. D 12. D

15.

Seção Enem

01. B 02. A

FÍSICA

Refração da luz

MÓDULO 04 — FRENTE C

A velocidade com que a luz de uma dada cor se propaga em um meio transparente é, na maioria das vezes, específica de cada meio. A refração é o fenômeno pelo qual a luz, ao passar de um meio de propagação para outro, diferente do primeiro, altera, necessariamente, o módulo de sua velocidade de propagação. Podemos enxergar um objeto através de uma substância transparente, como uma lente, uma placa de vidro ou uma porção de água, em decorrência da refração. Esse fenômeno é responsável pelo funcionamento das lentes, de alguns aparelhos de observação e de projeção e, também, pelo funcionamento dos instrumentos que usam a fibra óptica, para citar apenas alguns exemplos. O fenômeno de refração pode, também, explicar a formação e as cores de um arco-íris.

Já vimos que cada radiação luminosa (cor de luz) é caracterizada por uma frequência (f), e sabemos que um objeto vermelho, por exemplo, mantém a sua cor dentro de qualquer substância transparente. Assim, podemos inferir que a frequência da luz não é alterada quando esta sofre refração. Uma grandeza importante de cada onda luminosa é o comprimento de onda (λ). Para o estudo deste módulo, devemos saber, inicialmente, que o comprimento de onda (λ) da luz, dentro de uma dada substância, é inversamente proporcional à sua frequência (f).

Vamos considerar, por ora, que a luz é constituída de uma só radiação (única cor), ou seja, ela é monocromática. Alguns fenômenos só ocorrem com a presença de luz policromática (formada por radiações de várias cores) e, quando for o caso, isso será especificado.

A figura a seguir mostra a luz amarela de uma lanterna que incide em uma placa de vidro. Veja que parte da luz sofre reflexão (continua se propagando no ar) após atingir a superfície do vidro. Os feixes incidente e refletido apresentam a mesma velocidade de propagação (v_{Ar}).

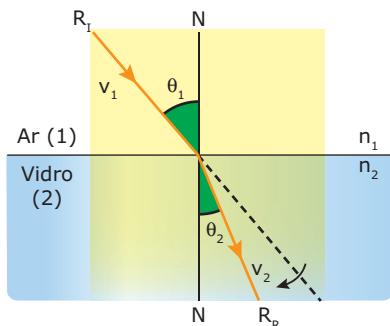
Observe, ainda, que uma parcela da luz passa do ar para o vidro, ou seja, sofre refração. Dentro do vidro, a velocidade de propagação da luz (v_{Vidro}) é diferente da sua velocidade de propagação no ar.

A velocidade da luz no vácuo (c) é constante, e possui o maior valor em relação a qualquer outro meio de propagação, sendo igual a, aproximadamente, c = 3,0 x 10^8 m/s. Dessa forma, quando a luz adentrar em uma substância qualquer, vinda do vácuo, a sua velocidade será reduzida. A grandeza que caracteriza a influência de um dado meio na velocidade de propagação da luz, de certa frequência, é o **índice de refração absoluto (n)** da substância. Esse índice é definido como a razão entre as velocidades da luz no vácuo (c) e na substância (v), ou seja:

$$n = \frac{c}{v}$$

Conforme a definição, o índice de refração absoluto do vácuo é n = 1. A tabela a seguir mostra os valores aproximados da velocidade da luz e dos índices de refração absolutos de alguns meios (para a luz amarela do sódio). Os valores podem variar com as impurezas e com as misturas contidas no material e, para os fluidos, também com a temperatura.

Meio	Velocidade da luz (v)	Índice de refração absoluto (n)
Ar	≅ 3,0 x 10^8 m/s	≅ 1,0
Água	2,250 x 10^8 m/s	1,333
Vidro	≅ 1,980 x 10^8 m/s	1,515
Diamante	1,241 x 10^8 m/s	2,417
Rutilo	1,073 x 10^8 m/s	2,795

Três conclusões importantes devem ser tiradas da definição e tabela anteriores.

1. A velocidade da luz em qualquer meio (v) é **inversamente** proporcional ao índice de refração (n) desse meio, uma vez que a velocidade da luz no vácuo é constante.
2. O **ar** pode ser considerado como apresentando o **menor** índice de refração entre todas as substâncias. O seu valor (n_{Ar} ≅ 1,0) é importante e deve ser conhecido.
3. O índice de refração (n) é um número adimensional (sem unidade de medição acompanhando seu valor numérico), uma vez que é a razão entre duas velocidades.

O índice de refração absoluto (n) de um meio indica o quanto a velocidade de propagação da luz é reduzida, em relação a seu valor no vácuo, quando a luz se propaga nesse meio. Considere uma substância de índice de refração n = 3. Isso quer dizer que a velocidade da luz nessa substância é três vezes menor que no vácuo. Ou seja, a velocidade será $v = 1,0 \times 10^8$ m/s.

É comum usar o termo "meio muito refringente" para expressar que o índice de refração de um meio apresenta um valor elevado. Para se referir a um meio cujo índice de refração seja pequeno, é usado o termo "meio pouco refringente". Assim, o rutilo é o meio mais refringente entre aqueles listados na tabela anterior.

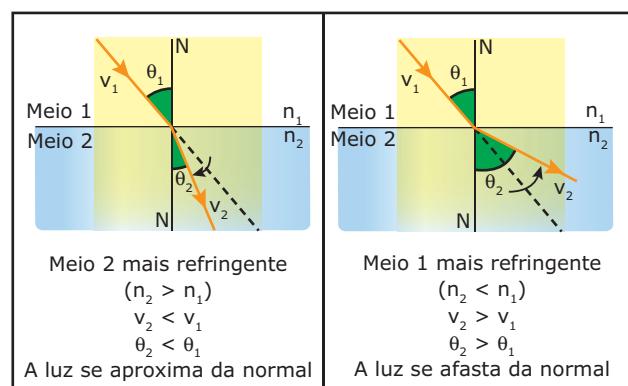
As leis da refração

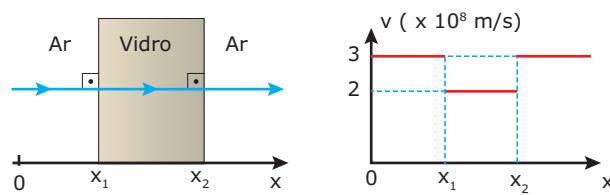
Quando um feixe de luz incide em uma substância, ele sofre, na maioria das vezes, refração, reflexão e absorção. Neste módulo, vamos considerar apenas a refração da luz, quando esta incide sobre a superfície de separação de dois meios. Se a reflexão ou a absorção forem importantes para a situação em questão, isso será especificado. A figura a seguir mostra um raio de luz que passa do **ar** (meio 1) para o **vidro** (meio 2). Observe, nesse caso, que os raios incidente e refratado têm direções diferentes.

Na figura, temos, respectivamente:

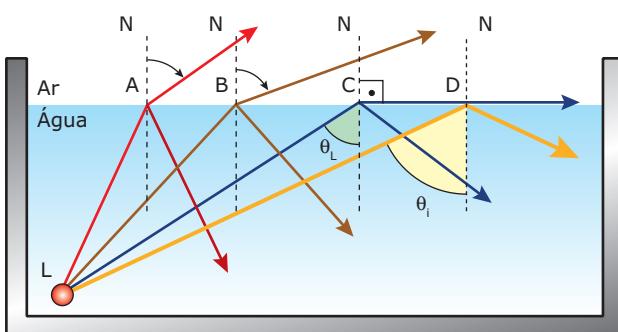
- Ar (1) e vidro (2) – meios 1 e 2;
- R_I e R_R – raios incidente e refratado;
- v_1 e v_2 – velocidade da luz nos meios 1 e 2;
- θ_1 e θ_2 – ângulos de incidência e de refração (em relação à normal);
- N – reta normal (perpendicular à superfície no ponto de incidência da luz).

As leis que regem a refração são:

1ª: O raio incidente, o raio refratado e a reta normal são coplanares.

2ª: (Lei de Snell): Os ângulos formados pelos raios incidente e refratado com a reta normal (θ_1 e θ_2), os índices de refração (n_1 e n_2) e os módulos das velocidades de propagação (v_1 e v_2) nos meios 1 e 2, respectivamente, se relacionam pelas equações:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} n_1.\text{sen } \theta_1 = n_2.\text{sen } \theta_2 \\ v_2.\text{sen } \theta_1 = v_1.\text{sen } \theta_2 \end{cases}$$

Analisando as equações anteriores, verificamos que o seno do ângulo formado pelo raio de luz com a reta normal, em um dado meio, é proporcional à velocidade de propagação da luz nesse meio e inversamente proporcional ao índice de refração do respectivo meio. O seno de um ângulo agudo é tanto maior quanto maior for o ângulo em questão. Assim, podemos dizer que quanto maior o ângulo formado com a normal, maior a velocidade de propagação da luz e menor o índice de refração absoluto daquele meio. Na figura anterior, temos:

$$\theta_2 < \theta_1 \Rightarrow \begin{cases} v_2 < v_1 \\ n_2 > n_1 \end{cases}$$

A luz, ao sofrer refração, pode se **aproximar** ou se **afastar** da normal, dependendo dos meios envolvidos. Veja as figuras a seguir.

Um caso especial de refração ocorre quando $\theta_1 = 0°$ (a luz incide perpendicularmente à superfície). Assim, a incidência ocorre sobre a normal, e a **luz se refrata sem sofrer desvio**. Em outras palavras, a luz transmitida muda de meio, altera o módulo de sua velocidade de propagação, porém não sofre o desvio mostrado na figura anterior. Vamos ilustrar essa situação através da figura a seguir. Ela mostra um raio de luz atravessando uma placa de vidro imersa no ar. O raio, ao entrar na placa de vidro ou ao sair dela, sofre refrações sem desvio, pois incidiu sempre perpendicularmente às superfícies de separação dos meios. Veja, também, o gráfico da velocidade da luz em função da posição desta ao longo do trajeto.

REFLEXÃO TOTAL

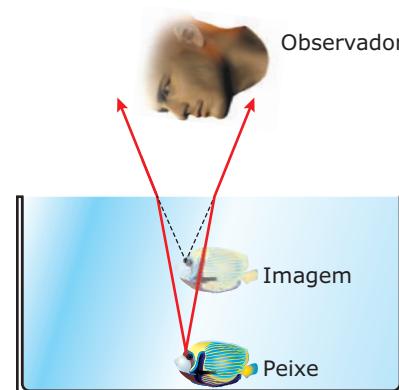
Um fenômeno óptico muito útil é chamado **reflexão total**. Para entendê-lo, consideremos um recipiente largo contendo água. Uma pequena lâmpada L, que irradia luz monocromática, está afixada no canto inferior do recipiente, conforme mostrado na figura a seguir. As linhas pontilhadas representam as normais (N) nos pontos A, B, C e D. A figura mostra raios de luz em cores distintas para indicar ângulos de incidência diferentes. Observe que o raio **LA** (vermelho), ao incidir sobre a superfície de separação entre a água e o ar, sofre os fenômenos de reflexão e de refração. O raio refratado afasta-se da normal, pois o índice de refração do ar é menor que o da água. O mesmo fato ocorre com o raio incidente **LB** (marrom). Nesse caso, porém, o raio refratado afasta-se da normal de forma mais acentuada do que o raio **LA**. Isso ocorre porque, de acordo com a Lei de Snell, quanto maior for o ângulo de incidência, maior será o ângulo de refração.

Existe um raio **LC** (azul), cujo ângulo de incidência θ_L, chamado de **ângulo limite**, é o maior ângulo para o qual ainda ocorre o fenômeno de refração. Observe a figura com atenção e veja que o raio refratado em C se propaga no ar, porém, rasante à superfície da água. Assim, o ângulo de refração é 90º.

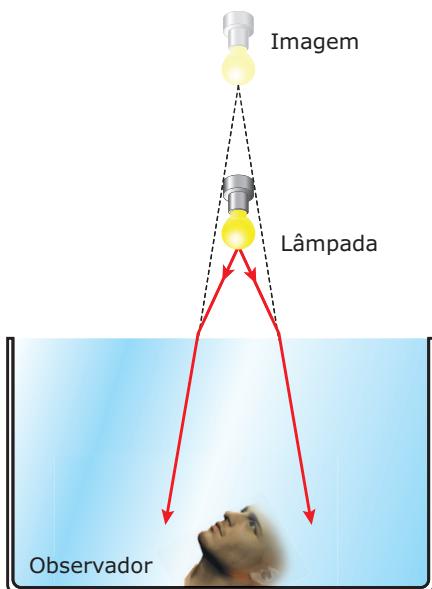
Qualquer raio que incida da água para o ar com um ângulo de incidência (θ_i) maior que θ_L será totalmente refletido pela interface água-ar, como aconteceu com o raio **LD** (alaranjado). Por isso, dizemos que esse raio sofreu reflexão total. É importante que você perceba a condição de existência do ângulo limite e, portanto, da reflexão total. Para tal, é necessário que a luz esteja se propagando numa substância de índice de refração **maior**, no qual a velocidade da luz é **menor** (mais refringente), e se dirija a outro meio de índice de refração menor, onde a velocidade da luz é maior (menos refringente). Para ocorrer a reflexão total, é necessário, além disso, que o ângulo de incidência (θ_i) seja maior que o ângulo limite (θ_L).

Podemos determinar o seno do ângulo limite θ_L (e, assim, o ângulo limite) entre um meio mais refringente (índice de refração n_1, maior) e outro menos refringente (índice de refração n_2, menor) utilizando a Lei de Snell:

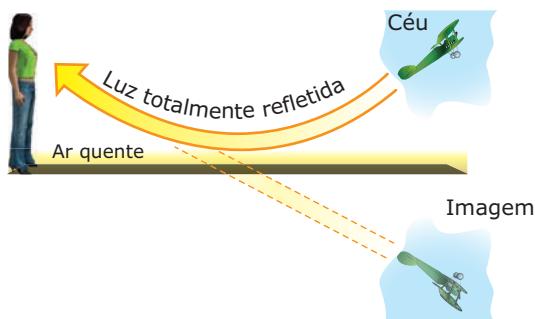
$$n_1.\text{sen } \theta_1 = n_2.\text{sen } \theta_2 \Rightarrow n_1.\text{sen } \theta_L = n_2.\text{sen } 90°$$

$$\Rightarrow n_1.\text{sen } \theta_L = n_2.1 \Rightarrow \text{sen } \theta_L = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_{Menor}}{n_{Maior}}$$

Em termo das velocidades de propagação, a equação anterior pode ser escrita como:

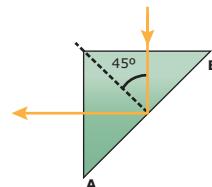
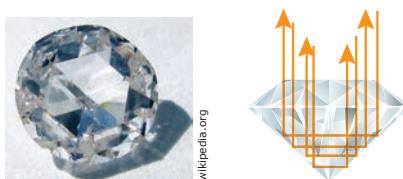
$$v_2.\text{sen } \theta_L = v_1.\text{sen } 90° \Rightarrow \text{sen } \theta_L = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_{Menor}}{v_{Maior}}$$

APLICAÇÕES DA REFRAÇÃO E DA REFLEXÃO TOTAL

Formação de imagem por refração

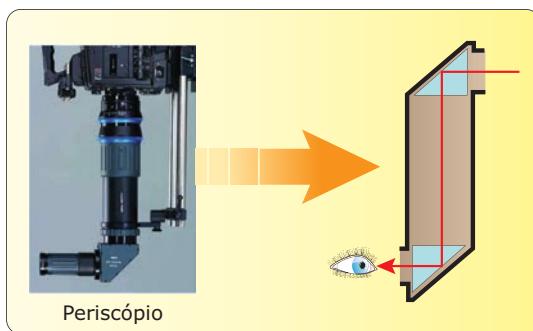
Imagine um aquário com água cristalina e um peixe próximo ao fundo. Se olhar o aquário por cima, próximo à vertical em que se encontra o objeto (peixe), você não o verá. No entanto, será vista uma imagem virtual do objeto, **acima** de sua posição real (mais **perto** do observador), conforme mostrado a seguir.

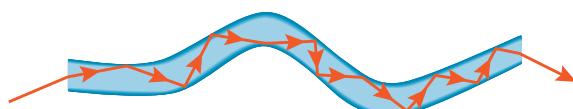
Veja que os dois raios de luz que partem do peixe afastam-se da normal (não mostrada na figura) ao passar da água para o ar. Prolongando os raios refratados, encontramos a posição na qual nosso sistema óptico formará a imagem do peixe (figura fora de escala).

Agora, imagine que você está mergulhado na água de uma piscina. Se olhar uma lâmpada, por exemplo, fora dela, você não verá a lâmpada, mas uma imagem virtual dela **acima** de sua posição real (mais **longe** do observador), conforme mostrado a seguir (figura fora de escala).

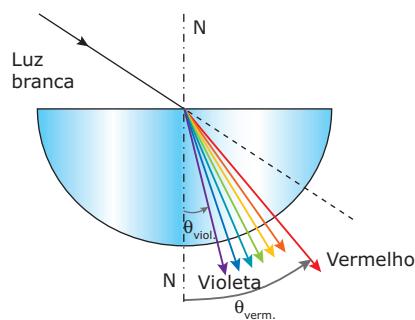
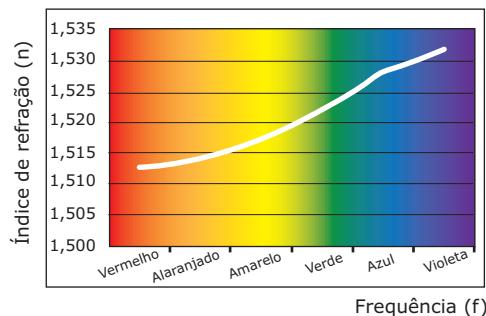
Os raios de luz emitidos pela lâmpada, em direção ao observador, que está dentro da água, aproximam-se da normal (não mostrada na figura) ao entrarem na água. Note que a luz que chega ao observador é divergente e que a imagem é formada no ponto em que os prolongamentos dos raios refratados se encontraram. Fenômeno análogo ocorre quando percebemos a imagem de uma estrela vista aqui da Terra (chamada de "posição aparente" da estrela). Devido ao fenômeno de refração, a imagem é observada acima da posição real da estrela.

APLICAÇÕES DA REFLEXÃO TOTAL

Agora, vamos entender o fenômeno da miragem, fenômeno de formação de imagens pelo ar quente sobre o asfalto ou sobre outra superfície aquecida. Na situação da figura a seguir, a película de ar em contato com o asfalto está a uma maior temperatura que o ar acima dela. Sabe-se que a velocidade da luz no ar é maior para temperaturas mais elevadas. Para que o fenômeno da reflexão total possa ocorrer, a luz deve se propagar de uma região de menor velocidade para outra de maior velocidade. Portanto, a luz que vem em direção ao solo pode sofrer reflexão total ao se aproximar do chão e, assim, pode atingir os olhos do observador. A figura seguinte mostra a luz sofrendo reflexão total sobre uma película de ar em contato com uma pista quente. Nessa situação, o observador terá a impressão de que existe uma poça de água sobre a estrada.

A fotografia a seguir mostra a imagem dos pneus de um caminhão formada pela reflexão total que ocorre no ar aquecido próximo ao asfalto.

SXC

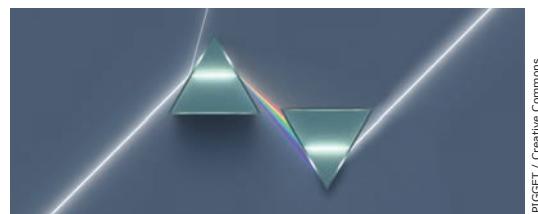
Outra aplicação da reflexão total é o prisma de reflexão. A figura a seguir representa um prisma de vidro de base triangular, apresentando dois ângulos internos iguais a 45°. Os índices de refração do vidro e do ar são iguais a 1,5 e 1,0, respectivamente. Assim, o seno do ângulo limite, entre o ar e o vidro, é sen θ_L = 1,0/1,5 = 0,667. Consultando a tabela trigonométrica, encontraremos um ângulo limite $\theta_L \cong 42°$. Por isso, todo raio que incide perpendicularmente às laterais do prisma, conforme representado na figura, sofre reflexão total ao atingir a face **AB**.

Um diamante lapidado se comporta como um prisma de reflexão total. Ele apresenta um brilho característico devido às várias reflexões totais da luz que ocorrem em seu interior. Veja a seguir.

wikipedia.org

O prisma de reflexão total é muito utilizado em dispositivos ópticos como binóculos e periscópios. Isso se deve ao fato de a face **AB** do prisma se comportar como um espelho plano, refletindo totalmente grande parte da luz. As figuras a seguir mostram, de forma esquemática, o trajeto da luz através de um binóculo e de um periscópio de submarino, bem como a reflexão total nos respectivos prismas.

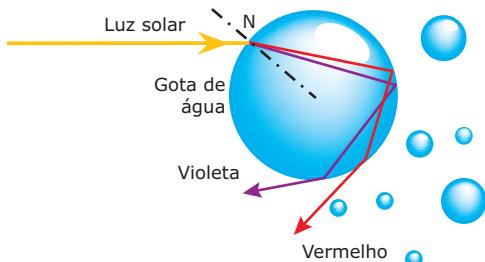
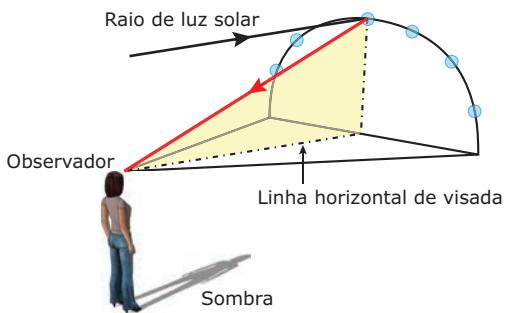
Uma vez que são usados dois prismas em cada trajeto de luz, a imagem formada por esses dispositivos não apresenta inversão lateral, já que o segundo prisma compensa a inversão do primeiro.

Uma terceira aplicação da reflexão total é a fibra óptica, uma espécie de "mangueira" condutora de luz. A fibra óptica é constituída de um núcleo de material transparente que apresenta um índice de refração muito elevado em relação ao do material que o reveste. Por isso, o ângulo limite entre o núcleo da fibra óptica e o material do revestimento é muito pequeno. Um raio de luz que penetra em um dos lados de uma fibra óptica sofre múltiplas reflexões totais, saindo do outro lado com poucas perdas, como está representado na figura a seguir.

Atualmente, as fibras ópticas são utilizadas como cabos para transmissão de dados (telefonia, televisão, Internet e outros) e como fios transportadores de luz para iluminar o interior do corpo humano em intervenções médicas, como a endoscopia, entre outras aplicações.

DISPERSÃO DA LUZ BRANCA

Considere um feixe de luz branca (cuja direção, dentro do vidro, está representada pela linha pontilhada oblíqua) que incide sobre um hemisfério de vidro, como representado na figura a seguir. Observe que a luz branca se refrata, na interface ar-vidro, dando origem a um feixe colorido constituído por uma infinidade de luzes de cores distintas. Esse feixe apresenta sete cores básicas, na seguinte ordem de aproximação em relação à reta normal: vermelha (aquela que menos se aproxima da normal), alaranjada, amarela, verde, azul, anil e violeta (aquela que mais se aproxima da normal).

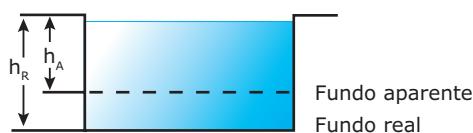
Observe, atentamente, que todas as radiações se aproximam da normal. Veja, ainda, que o ângulo formado pelo raio refratado, com a normal, é menor para a luz violeta do que para as demais cores. Todas as radiações que constituem a luz branca apresentam a mesma velocidade (c) no vácuo e no ar. Em substâncias dispersivas, como os sólidos e os líquidos, de forma geral, o índice de refração (n) do meio de propagação varia com a frequência (f) e, portanto, com a cor da radiação. Logo, a velocidade da luz, em um meio dispersivo, também varia com a cor da radiação. Por esse motivo, existe uma decomposição da luz branca nas cores que formam o espectro da luz visível. O gráfico a seguir mostra como varia o índice de refração (n) do vidro em função da frequência (f) da luz. Observe que o índice de refração aumenta da cor vermelha para a violeta.

Conforme sabemos, o ângulo (θ_N), formado pelo raio de luz com a normal, e a velocidade da luz (v), em um dado meio, são tanto **menores** quanto **maior** for o índice de refração (n) desse meio. Isso nos permite concluir que:

$$n_{viol.} > \ldots > n_{verm.} \Rightarrow \begin{cases} \theta_{viol.} < \ldots < \theta_{verm.} \\ v_{viol.} < \ldots < v_{verm.} \end{cases}$$

A separação da luz branca nas suas cores componentes é chamada de **dispersão** ou **decomposição** da luz branca.

Um fato interessante, descoberto por Newton em 1672, é que da mesma forma que um prisma, por exemplo, pode dispersar a luz nas suas cores componentes, ele pode recombiná-las para obter o branco novamente. Veja a fotografia a seguir.

SPIGGET / Creative Commons

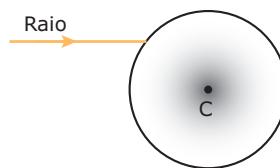
A formação do arco-íris envolve a combinação de vários fenômenos ópticos já estudados. Observe que um arco-íris somente é visível quando o Sol está às nossas costas. Portanto, os raios de luz do Sol que atingem nossos olhos estão sendo refletidos por gotas de água dispersas na atmosfera. Veja, a seguir, a trajetória da luz branca (luz policromática emitida pelo Sol) e das radiações coloridas dispersas em uma gota de água. Nesta figura, com o objetivo de simplificar, foram desenhadas apenas as cores vermelha e violeta.

As demais cores se distribuem entre as duas citadas. A luz branca, ao incidir sobre a gota, sofre uma refração e, consequentemente, se dispersa. No lado direito da gota, a luz sofre uma reflexão total e, posteriormente, ao sair para o ar, a luz sofre uma segunda refração.

O ângulo entre a luz refletida pela gota e a linha horizontal de visada deve ser sempre o mesmo para uma determinada cor. Veja a figura a seguir. Se você girar o triângulo destacado em torno da linha horizontal de visada, o seu vértice superior descreve um arco de círculo, conforme mostrado. As gotas que ocupam esse arco, e apenas elas, refletem a luz vermelha, por exemplo, para os olhos do observador. Por esse motivo, o arco-íris tem a forma de um arco.

Veja a seguir a fotografia de um arco-íris.

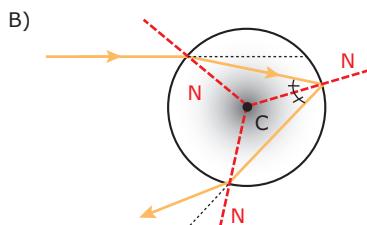
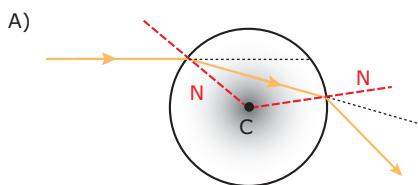
SXC

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

01. Alice, após a aula de refração, foi ao clube e, estando ao lado da piscina, olha verticalmente para o fundo dela. Alice percebe que o fundo parece estar mais perto dela do que encontra-se na realidade. A piscina tem 4,0 m de profundidade e está cheia de água. O índice de refração da água é n_A = 4/3. Determinar a profundidade aparente da piscina.

Resolução:

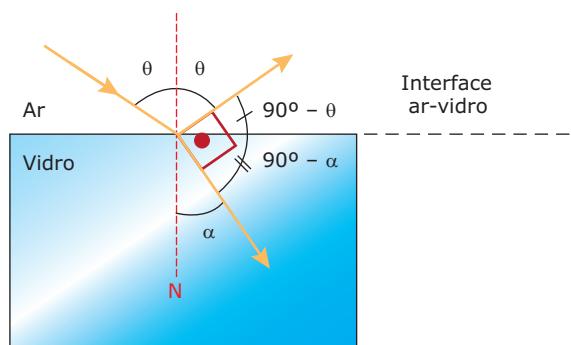
Sabemos que a imagem de um objeto mergulhado na água parece mais próxima da superfície do que realmente está. Assim, a imagem do fundo da piscina (fundo aparente) está mais perto de Alice do que o fundo real, conforme mostrado na figura. A relação entre as profundidades aparente (h_A) e real (h_R) é dada pela relação entre o menor e o maior índice de refração dos meios, ou seja:

$$\frac{h_A}{h_R} = \frac{n_{Menor}}{n_{Maior}} \Rightarrow \frac{h_A}{h_R} = \frac{n_{Ar}}{n_{Água}} \Rightarrow \frac{h_A}{4,0} = \frac{1,0}{4/3} \Rightarrow h_A = 3,0\,m$$

02. Um raio de luz monocromática incide numa "gota" de vidro, de centro C, conforme mostrado na figura a seguir.

Determinar as trajetórias dos raios de luz que emergem da gota após

A) duas refrações.

B) uma refração, uma reflexão interna e outra refração.

Resolução:

A normal, em qualquer ponto da superfície da gota, deve, necessariamente, passar pelo centro C dessa gota. Se a luz vai do ar para o vidro ($n_V > n_{Ar}$), ela deve se aproximar da normal e, quando sai do vidro para o ar, deve se afastar da normal. Assim, temos:

Observação: As figuras foram desenhadas separadas com o objetivo de tornar clara a solução. Na realidade, os dois raios emergentes podem existir simultaneamente.

03. Um raio de luz monocromática, vindo do ar, incide numa placa de vidro ($n_V = 1,5$), sofrendo reflexão e refração. Determinar o ângulo de incidência (θ) para que os raios refletido e refratado formem um ângulo de 90°.

Resolução:

Observe a figura anterior. Lembre-se de que

- a normal (N) forma 90° com a interface ar-vidro;
- o ângulo de reflexão (θ) é igual ao de incidência (θ);
- os ângulos entre os raios refletido e refratado com a interface ar-vidro são complementares de θ e α, respectivamente;
- de acordo com a trigonometria, o seno de um ângulo é igual ao cosseno do seu complemento.

Assim, a partir da figura e da Lei de Snell, temos:

- $90° = (90° - \theta) + (90° - \alpha) \Rightarrow \alpha = 90° - \theta$ (α e θ são complementares) $\Rightarrow$ sen α = cos θ;
- n_{Ar}.sen θ = n_V.sen α $\Rightarrow$ 1,0.sen θ = 1,5.cos θ $\Rightarrow$ tg θ = 1,5.

Consultando a tabela trigonométrica, temos que $\theta = 56,3°$.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (UNIFESP-SP) Um raio de luz monocromática provém de um meio mais refringente e incide na superfície de separação com outro meio menos refringente. Sendo ambos os meios transparentes, pode-se afirmar que esse raio,

A) dependendo do ângulo de incidência, sempre sofre refração, mas pode não sofrer reflexão.

B) dependendo do ângulo de incidência, sempre sofre reflexão, mas pode não sofrer refração.

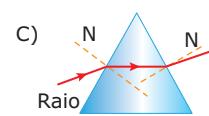
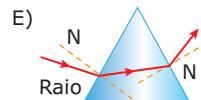
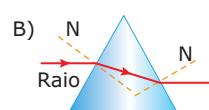
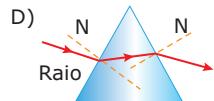
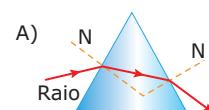
C) qualquer que seja o ângulo de incidência, só pode sofrer refração, nunca reflexão.

D) qualquer que seja o ângulo de incidência, só pode sofrer reflexão, nunca refração.

E) qualquer que seja o ângulo de incidência, sempre sofre refração e reflexão.

02. (UFMG–2006) Rafael e Joana observam que, após atravessar um aquário cheio de água, um feixe de luz do Sol se decompõe em várias cores, que são vistas num anteparo que intercepta o feixe. Tentando explicar esse fenômeno, cada um deles faz uma afirmativa:

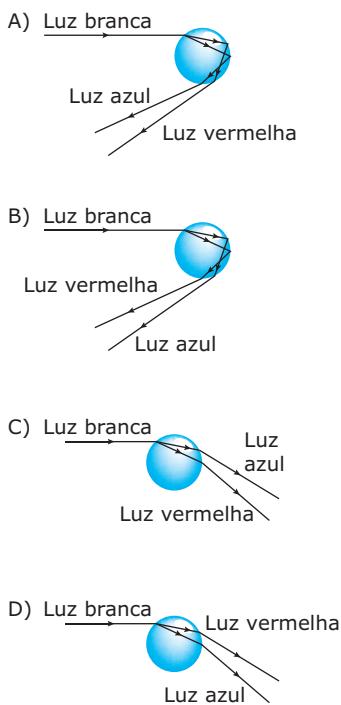
Rafael: Isso acontece porque, ao atravessar o aquário, a frequência da luz é alterada.

Joana: Isso acontece porque, na água, a velocidade da luz depende da frequência.

Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que

A) ambas as afirmativas estão certas.

B) apenas a afirmativa de Rafael está certa.

C) ambas as afirmativas estão erradas.

D) apenas a afirmativa de Joana está certa.

03. (CEFET-MG–2009) Sobre o comportamento da luz em diferentes meios, é **CORRETO** afirmar que

A) as estrelas cintilam porque a luz proveniente delas sofre sucessivas reflexões na atmosfera.

B) um raio de luz, ao penetrar na água, tem sua velocidade de propagação e frequência alteradas.

C) um objeto dentro de uma piscina parece estar em uma posição diferente da real, se observado de fora.

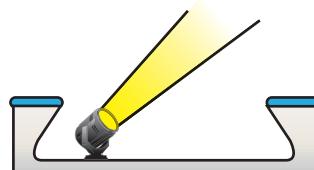
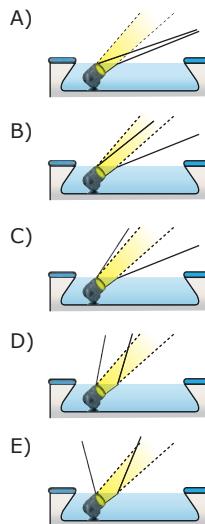
D) a duração do dia terrestre é ligeiramente prolongada devido à reflexão da luz solar na atmosfera.

E) uma estrada asfaltada, em um dia quente, aparenta estar molhada, por causa da refração da luz solar no asfalto.

04. (UFMG) A figura que **MELHOR** representa um raio de luz monocromática atravessando um prisma de vidro no ar é

A)
D)
B)
E)
C)

05. (UFMG–2010) Um arco-íris forma-se devido à dispersão da luz do Sol em gotas de água na atmosfera. Após incidir sobre gotas de água na atmosfera, raios de luz são refratados; em seguida, eles são totalmente refletidos e novamente refratados. Sabe-se que o índice de refração da água para a luz azul é maior que para a luz vermelha. Considerando essas informações, assinale a alternativa em que estão **MELHOR** representados os fenômenos que ocorrem em uma gota de água e dão origem a um arco-íris.

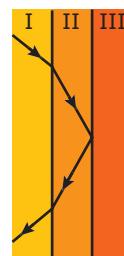
A)
B)
C)
D)
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (UFSM-RS–2006) Um raio de luz monocromática passa de um meio 1 para um meio 2 e deste para um meio 3, conforme indicado na figura.

Com relação à velocidade de propagação da luz nesses três meios, assinale a alternativa **CORRETA**.

A) $v_1 > v_2 > v_3$

B) $v_3 > v_1 > v_2$

C) $v_2 > v_3 > v_1$

D) $v_1 > v_3 > v_2$

E) $v_3 > v_2 > v_1$

02. (UFSCar-SP / Adaptado) Um canhão de luz foi montado no fundo de um laguinho artificial. Quando o lago se encontra vazio, o feixe produzido corresponde ao representado na figura.

Quando cheio de água, uma vez que o índice de refração da água é maior que o do ar, o esquema que **MELHOR** representa o caminho a ser seguido pelo feixe de luz é

03. (UFMG) A figura mostra a trajetória de um feixe de luz que vem de um meio I, atravessa um meio II, é totalmente refletido na interface dos meios II e III e retorna ao meio I.

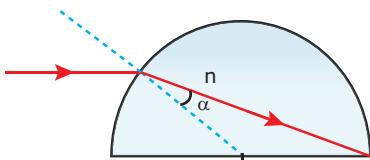
Sabe-se que o índice de refração do ar é menor que o da água e que o da água é menor que o do vidro.

Nesse caso, é **CORRETO** afirmar que os meios I, II e III podem ser, respectivamente,

A) ar, água e vidro.

B) vidro, água e ar.

C) água, ar e vidro.

D) ar, vidro e água.

04. (CEFET-MG–2010) Analise as afirmativas a seguir sobre o fenômeno da refração da luz entre dois meios de propagação.

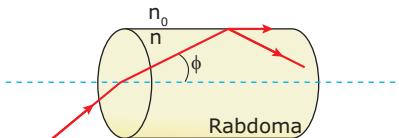
I. No meio menos refringente, a velocidade de um raio de luz é maior do que no vácuo.

II. Independentemente dos meios de propagação, o desvio do raio luminoso pode não ocorrer.

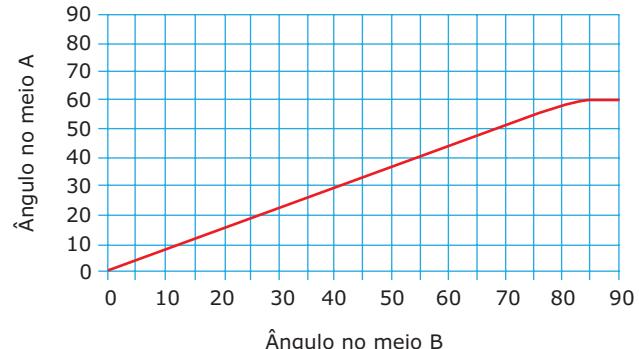
III. O desvio do raio de luz ocorre somente quando ele passa do meio mais refringente para o menos refringente.

IV. Em um meio menos refringente, o raio luminoso refratado, para uma incidência oblíqua, afasta-se da normal.

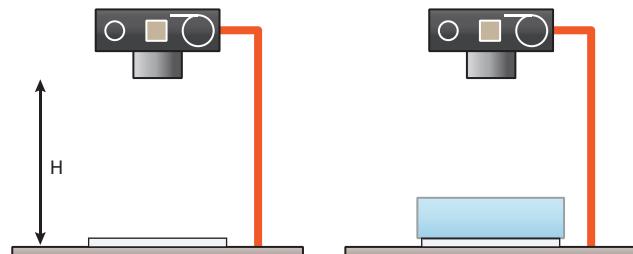
São **CORRETAS** apenas as afirmativas

A) I e II.
B) I e III.
C) II e III.
D) II e IV.
E) III e IV.

05. (Cesgranrio) Um semicírculo é feito de um material transparente. Um raio luminoso monocromático, propagando-se no ar (cujo índice de refração supõe-se igual a 1,0), incide na superfície curva desse cilindro, paralelamente ao seu diâmetro, refratando-se com um ângulo de refração α, conforme indica a figura a seguir.

Portanto, o índice de refração do material do semicilindro vale

A) $2\text{sen}\ \alpha$.
B) $2\cos\ \alpha$.
C) $1 - \text{sen}\ \alpha$.
D) $1 + \cos\ \alpha$.
E) $\text{tg}\ \alpha$.

06. (UFV-MG–2008) Nos olhos de alguns insetos, existe uma estrutura cilíndrica, o rabdoma. Como mostrado na figura adiante, os raios luminosos que chegam à extremidade do rabdoma com ângulo máximo de abertura ϕ não escapam do seu interior, como ocorre em uma fibra óptica fabricada pelo homem. Os índices de refração do rabdoma e do meio que o cerca são n e n_0, respectivamente.

Então, é **CORRETO** afirmar que

A) $n < n_0$ e $\cos \phi = n_0/n$.
B) $n > n_0$ e $\cos \phi = n_0/n$.
C) $n < n_0$ e $\text{sen}\ \phi = n/n_0$.
D) $n > n_0$ e $\text{sen}\ \phi = n_0/n$.

07. (UNIFESP-SP) O gráfico mostra a relação entre os ângulos de incidência e de refração entre dois materiais transparentes e homogêneos, quando um raio de luz incide sobre a superfície de separação entre esses meios, qualquer que seja o sentido do percurso.

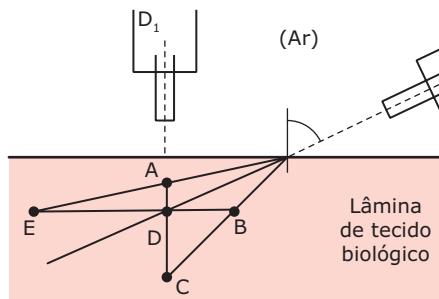
Se esses materiais fossem utilizados para produzir a casca e o núcleo de fibras ópticas, deveria compor o núcleo da fibra o meio

A) A, por ser o mais refringente.
B) B, por ser o menos refringente.
C) A, por permitir ângulos de incidência maiores.
D) B, porque nele a luz sofre maior desvio.
E) A ou B, indiferentemente, porque nas fibras ópticas não ocorre refração.

08. (FUVEST-SP) Certa máquina fotográfica é fixada a uma distância H da superfície de uma mesa, montada de tal forma a fotografar, com nitidez, um desenho em uma folha de papel que está sobre a mesa. Desejando manter a folha esticada, uma placa de vidro, com 5 cm de espessura, é colocada sobre a folha. Na nova situação, pode-se fazer com que a fotografia do desenho continue igualmente nítida, sem alterar a distância focal da máquina, se a distância H for

A) aumentada de menos de 5 cm.
B) aumentada de mais de 5 cm.
C) reduzida de menos de 5 cm.
D) reduzida de mais de 5 cm.
E) mantida com o mesmo valor inicial.

09. (UFMG) Um professor pediu a seus alunos que explicassem por que um lápis, dentro de um copo com água, parece estar quebrado, como mostrado nesta figura.

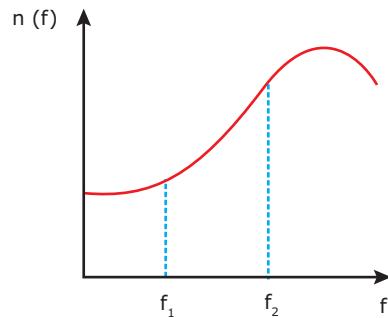
Bruno respondeu: "Isso ocorre porque a velocidade da luz na água é menor que a velocidade da luz no ar".

Tomás explicou: "Esse fenômeno está relacionado com a alteração da frequência da luz quando esta muda de meio".

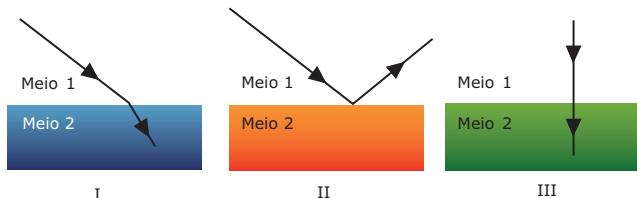
Considerando-se essas duas respostas, é **CORRETO** afirmar que

A) apenas a de Bruno está certa.

B) apenas a de Tomás está certa.

C) as duas estão certas.

D) nenhuma das duas está certa.

10. (FUVEST-SP–2009) Dois sistemas ópticos, D_1 e D_2, são utilizados para analisar uma lâmina de tecido biológico a partir de direções diferentes. Em uma análise, a luz fluorescente, emitida por um indicador incorporado a uma pequena estrutura, presente no tecido, é captada, simultaneamente, pelos dois sistemas, ao longo das direções tracejadas. Levando-se em conta o desvio da luz pela refração, entre as posições indicadas, aquela que poderia corresponder à localização real dessa estrutura no tecido é

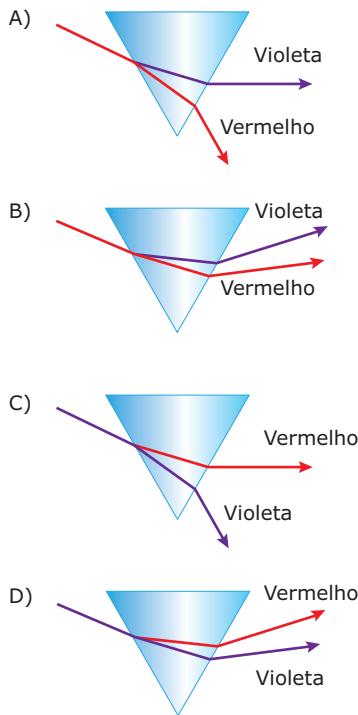
Observação: Suponha que o tecido biológico seja transparente à luz e tenha índice de refração uniforme, semelhante ao da água.

A) A.

B) B.

C) C.

D) D.

E) E.

11. (UFJF-MG) De uma maneira geral, sabemos que o índice de refração (n) de um determinado material depende da frequência da luz incidente (f). A figura a seguir representa o gráfico do índice de refração em função da frequência da luz incidente para um determinado material. Se f_1 e f_2 representam duas frequências quaisquer, podemos afirmar que, dentro do material,

A) as velocidades da luz são iguais para as duas frequências.

B) a velocidade da luz com frequência f_2 é maior que a velocidade da luz com frequência f_1.

C) a velocidade da luz com frequência f_1 é maior que a velocidade da luz com frequência f_2.

D) nada podemos afirmar sobre as velocidades, pois a velocidade da luz nesse material independe da frequência da luz incidente.

12. (UFMG) Nas figuras I, II e III, estão representados fenômenos físicos que podem ocorrer quando um feixe de luz incide na superfície de separação entre dois meios de índices de refração diferentes. Em cada uma delas, estão mostradas as trajetórias desse feixe. Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que ocorre mudança no módulo da velocidade do feixe de luz apenas no(s) fenômeno(s) físico(s) representado(s) em

A) I.

B) II.

C) I e II.

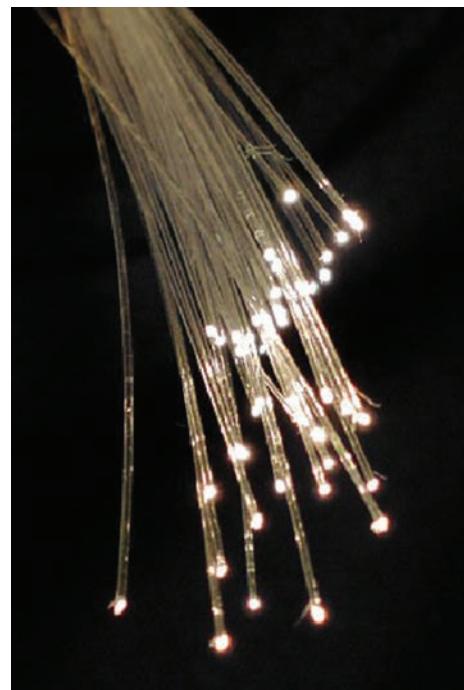
D) I e III.

13. (UFMG) Um estreito feixe de luz branca (luz solar), propagando-se no ar, incide em um prisma de vidro, sofrendo dispersão e originando o espectro da luz branca. Indique a alternativa que **MELHOR** corresponde ao que é observado nesse fenômeno.

A)

B)

C)

D)

14. (FCMMG) Uma estrela é observada a 45º acima do horizonte na superfície terrestre. Por causa da refração atmosférica, na realidade, ela se encontra

A) abaixo dos 45º.

B) acima dos 45º.

C) no mesmo lugar.

D) levemente à direita.

15. (UFTM-MG) A miragem é um efeito óptico, frequente nos desertos, produzido pela reflexão total da luz solar na superfície comum a duas camadas de ar aquecidas diversamente, sendo a miragem vista, via de regra, em posição invertida. Esse fenômeno é consequência da

A) difração da luz durante sua trajetória.

B) difusão da luz ao atravessar as diferentes camadas da atmosfera.

C) presença de oásis nas regiões desérticas da Terra.

D) forma esférica da Terra que facilita a dispersão da luz na atmosfera.

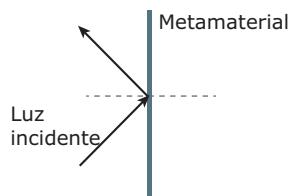
E) variação do índice de refração do ar com a sua densidade.

SEÇÃO ENEM

01. *A fibra óptica é um filamento de vidro ou de materiais poliméricos com capacidade de transmitir um feixe de luz, que, lançado em uma das extremidades, percorre a fibra por meio de reflexões sucessivas, emergindo quase que integralmente na outra extremidade, como ilustra a figura a seguir. A fibra possui no mínimo duas camadas: o núcleo e o revestimento. No núcleo, ocorre a transmissão da luz, que é possível graças a uma diferença de índice de refração entre o revestimento e o núcleo.*

Disponível em: www.wikpedia.com.br. (Adaptação)

wikipedia

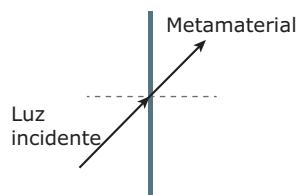
De acordo com as informações do texto e com os seus conhecimentos sobre Óptica, o índice de refração do núcleo de uma fibra óptica deve ser

A) maior que o do revestimento, para que ocorra reflexão total quando a luz incidir do núcleo para o revestimento.

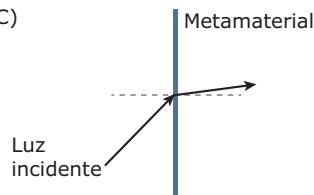
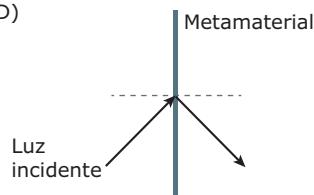
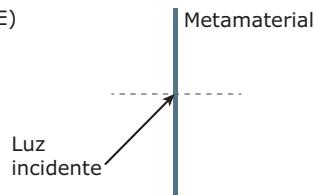
B) maior que o do revestimento, para que ocorra reflexão total quando a luz incidir do revestimento para o núcleo.

C) menor que o do revestimento, para que ocorra reflexão total quando a luz incidir do revestimento para o núcleo.

D) menor que o do revestimento, para que ocorra reflexão total quando a luz incidir do núcleo para o revestimento.

E) igual ao do revestimento, para que ocorra reflexão total quando a luz incidir do núcleo para o revestimento.

02. (Enem–2010) *Um grupo de cientistas liderado por pesquisadores do Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), nos Estados Unidos, construiu o primeiro metamaterial que apresenta valor negativo do índice de refração relativo para a luz visível. Denomina-se metamaterial um material óptico artificial, tridimensional, formado por pequenas estruturas menores que o comprimento de onda da luz, o que lhe dá propriedades e comportamentos que não são encontradas em materiais naturais. Esse material tem sido chamado de "canhoto".*

Disponível em: http://www.inivacaotecnologica.com.br. Acesso em: 28 abr. 2010. (Adaptação).

Considerando o comportamento atípico desse metamaterial, qual é a figura que representa a refração da luz ao passar do ar para esse meio?

A)

B)

C)

D)

E)

GABARITO

Fixação

01. B
02. D
03. C
04. A
05. A

Propostos

01. B
02. B
03. B
04. D
05. B
06. B
07. A
08. A
09. A
10. C
11. C
12. D
13. B
14. A
15. E

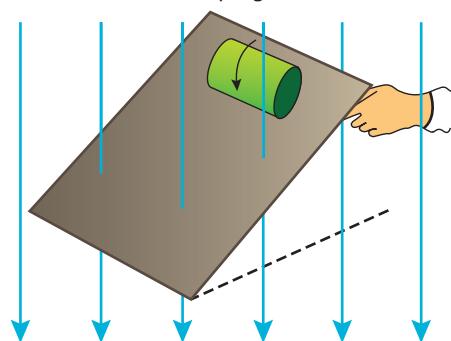
Seção Enem

01. A
02. D

FÍSICA

MÓDULO 04 FRENTE D

Trabalho e potencial elétrico

Neste módulo, estudaremos o trabalho realizado por forças elétricas e o potencial elétrico. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de potencial elétrico é o volt (V), nome que você certamente já ouviu. Um fio de alta tensão de 10 mil volts, uma bateria automobilística de 12 V e uma tomada de força de 127 V são exemplos clássicos do uso dessa unidade.

Você já sabe que uma carga elétrica cria um campo elétrico no espaço à sua volta. Uma carga cria também um potencial elétrico ao seu redor. Enquanto o campo elétrico nos indica o valor da força elétrica, por unidade de carga, que age em corpos eletrizados (e neutros), o potencial elétrico afere a energia potencial elétrica, por unidade de carga, que esses corpos adquirem no interior de um campo elétrico. Em geral, quando um objeto eletrizado se move entre dois pontos de um campo elétrico, a sua energia potencial elétrica varia. A variação dessa energia é igual à quantidade de trabalho realizado pela força elétrica. Por isso, campo e potencial elétrico são grandezas correlacionadas. Essas características do campo elétrico são semelhantes às do campo gravitacional que você estudou na Mecânica.

Iniciaremos este módulo conceituando fisicamente o potencial elétrico e a diferença de potencial elétrico. Depois, apresentaremos a definição operacional (matemática) para a diferença de potencial elétrico, a partir da qual deduziremos expressões para calcular o potencial gerado por cargas pontuais e a diferença de potencial em um campo elétrico uniforme. Por fim, estudaremos a energia potencial elétrica armazenada entre pares de cargas elétricas. Ao longo deste módulo, introduziremos o conceito de superfície equipotencial. O uso dessas superfícies, em conjunto com as linhas de força, aumentará o seu entendimento dos mapas de campo elétrico apresentados anteriormente.

O MOVIMENTO DE UMA CARGA EM UM CAMPO ELÉTRICO E O CONCEITO FÍSICO DE POTENCIAL ELÉTRICO

Vamos analisar o conceito de potencial gravitacional antes de estudar o potencial elétrico. Considere um cilindro em cima de um dos cantos de uma tábua que se acha sobre uma superfície horizontal. O cilindro não rola em direção ao outro canto simplesmente porque não existe diferença de nível entre eles. Dizemos, nesse caso, que os dois cantos se acham no mesmo potencial gravitacional. Assim, se a extremidade da tábua onde o cilindro se acha for erguida, conforme mostra a figura a seguir, o seu potencial gravitacional torna-se maior que o do outro canto. Por isso, o cilindro rola. A matéria se comporta assim, tende a se deslocar espontaneamente de potenciais gravitacionais maiores para potenciais gravitacionais menores.

Linhas do campo gravitacional

Movimento causado pela diferença de potencial gravitacional.

As linhas verticais mostradas na figura anterior são as linhas de força do campo gravitacional da Terra (elas apontam para baixo porque esse é o sentido da força gravitacional, e são paralelas porque o campo gravitacional é constante próximo à superfície do planeta). O potencial gravitacional, portanto, diminui no sentido das linhas de força do campo gravitacional.

No estudo sobre campo elétrico, aprendemos que a força elétrica que atua sobre uma carga positiva age no mesmo sentido do campo elétrico em que essa carga se acha, enquanto a força que atua sobre uma carga negativa age em sentido oposto ao das linhas de campo elétrico. A seguir, vamos analisar esse problema do ponto de vista do potencial elétrico. Para isso, considere a figura 1, que mostra uma carga pontual positiva Q fixada sobre um suporte isolante. Observe que a carga gera um campo elétrico, representado pelas linhas de força que divergem da carga. De forma semelhante ao caso gravitacional, o potencial elétrico também decresce no sentido das linhas de força. Assim, nessa figura, o potencial elétrico torna-se menor à medida que nos distanciamos da carga Q.

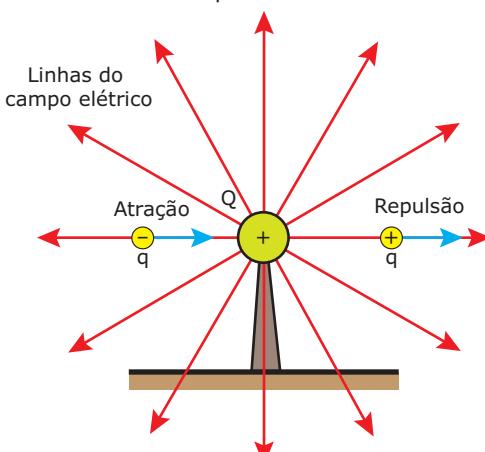



Figura 1: Movimentos causados pela diferença de potencial elétrico.

Agora, imagine que as duas pequenas cargas q, uma positiva e a outra negativa, tenham sido abandonadas nas posições indicadas na figura 1. A carga positiva é repelida pela carga Q e move-se para a direita, no sentido da linha de força horizontal direita. Ao contrário, a carga negativa é atraída e move-se em sentido oposto ao da linha de força horizontal esquerda. Essa situação parece sugerir que uma carga positiva move-se espontaneamente, buscando potenciais elétricos menores, enquanto uma carga negativa busca potenciais elétricos maiores. De fato, qualquer carga livre se comportará dessa forma quando for abandonada em um campo elétrico.

A seguir, vamos quantificar o potencial elétrico. Antes, certifique-se de que você entendeu e fixou os seguintes conceitos:

1) Uma carga positiva, solta em um campo elétrico, sofre ação de uma força elétrica no sentido desse campo e move-se em direção a potenciais elétricos menores. Ao contrário, uma carga negativa sofre ação de uma força em sentido oposto ao do campo elétrico e move-se para potenciais elétricos maiores.

2) O potencial elétrico decresce no sentido das linhas de força do campo elétrico.

O TRABALHO ELÉTRICO E A DEFINIÇÃO OPERACIONAL DA DIFERENÇA DE POTENCIAL ELÉTRICO

Considere a figura 2, que mostra as linhas de força de um campo elétrico uniforme. Imagine que uma carga de prova positiva q seja abandonada no ponto A. Sendo positiva, a carga sofre ação de uma força no mesmo sentido do campo, deslocando-se para a direita, em direção ao ponto B. Como a carga positiva move-se espontaneamente para potenciais elétricos menores, concluímos que o potencial elétrico do ponto A (V_A) é maior que o do ponto B (V_B). A diferença entre esses potenciais é denotada por $V_{AB} = V_A - V_B$. Esse termo pode ser chamado também de voltagem ou tensão elétrica entre A e B.

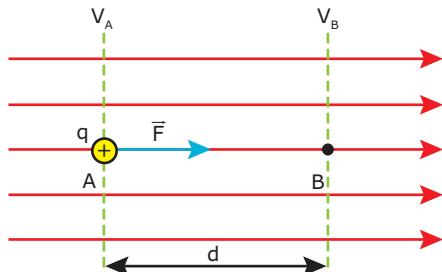



Figura 2: Diferença de potencial elétrico entre A e B.

No deslocamento da carga q, de A para B, a força elétrica realiza um trabalho W_{AB} (trabalho elétrico) sobre a carga q. Definimos matematicamente a diferença de potencial elétrico, V_{AB}, por meio da razão entre o trabalho elétrico e o valor da carga transportada pelo campo:

$$V_{AB} = V_A - V_B = \frac{W_{AB}}{q}$$

A voltagem V_{AB} não depende do valor da carga q usada nessa definição. Se a carga fosse 2q, o trabalho realizado seria o dobro, se a carga fosse 3q, o trabalho realizado seria o triplo, e assim por diante. Assim, a razão entre o trabalho e a carga é constante. Na verdade, a diferença de potencial em uma região depende apenas da carga fonte que a produziu, do meio dielétrico que preenche o espaço e da geometria envolvida no problema. Assim como o campo elétrico, o potencial elétrico é uma propriedade que se manifesta no espaço, algo que existe mesmo quando nenhuma carga de prova é ali colocada. Nos exemplos apresentados neste texto, procure identificar esses aspectos do potencial elétrico.

A diferença de potencial elétrico (e o próprio potencial elétrico) é uma grandeza escalar. A sua unidade no SI é o joule/coulomb (J/C) ou simplesmente volt (V). A bateria de um carro apresenta uma diferença de potencial elétrico de 12 V (12 J/C) entre os seus polos. Esse número indica que cada 1 C de carga que se desloca de um polo a outro da bateria, passando através do circuito elétrico interno da mesma, recebe 12 J de energia elétrica da bateria. Na figura anterior, se V_{AB} for 50 V, uma carga de +1 C receberá 50 J de energia elétrica (na forma de trabalho realizado pela força elétrica) no deslocamento de A para B.

Na equação que define a diferença de potencial elétrico, devemos levar em conta tanto o sinal do trabalho W_{AB} quanto o da carga q. Para a situação descrita na figura anterior, o trabalho atuante sobre q é positivo, pois a força elétrica age no mesmo sentido do deslocamento. Como o valor de q também é positivo, a razão W_{AB}/q é igualmente positiva. Isso significa que a diferença de potencial $V_A - V_B$ é positiva, e $V_A > V_B$. Esse resultado era esperado, pois o potencial elétrico diminui no sentido das linhas do campo elétrico. A mesma conclusão pode ser encontrada se uma carga $q < 0$ for abandonada em B. Nesse caso, a carga sofrerá ação de uma força em sentido oposto ao do campo e se moverá de B para A. A diferença de potencial entre B e A será definida por: $V_B - V_A = W_{BA}/q$. O trabalho W_{BA} será positivo, pois a força atuará no mesmo sentido do deslocamento (de B para A). Como $q < 0$, concluiremos, como antes, que $V_B - V_A < 0$ e que $V_B < V_A$.

DIFERENÇA DE POTENCIAL EM UM CAMPO ELÉTRICO UNIFORME

A equação apresentada no tópico anterior é geral. Você pode usá-la para avaliar a diferença de potencial elétrico criada por qualquer tipo de fonte. Quando o campo elétrico não for uniforme, a força elétrica atuante na carga q será variável ao longo do deslocamento, e o cálculo do trabalho elétrico poderá ser complicado. Porém, para o caso de um campo elétrico uniforme (como o da figura anterior), a força elétrica sobre a carga de prova é constante, e o trabalho elétrico pode ser calculado facilmente por meio da seguinte expressão:

$$W_{AB} = Fd\cos\theta$$

Nessa expressão, F é o módulo da força elétrica que age na carga de prova, d é o deslocamento da carga de prova e θ é o ângulo que a força elétrica forma com o deslocamento. Observe a figura 2, e veja que esse ângulo vale 0°, pois a força e o deslocamento apresentam sentidos iguais (para a direita). Como o cosseno de 0° vale +1, o trabalho elétrico, nessa situação, é simplesmente $W_{AB} = Fd$.

No estudo sobre campo elétrico, aprendemos que o módulo da força elétrica atuante sobre uma carga q pode ser calculado a partir dos valores do campo elétrico E e da carga q, por meio da expressão:

$$F = Eq$$

Então, podemos substituir essa expressão na equação do trabalho. A seguir, substituindo a equação do trabalho na definição de diferença de potencial elétrico, obtemos a seguinte equação para a diferença de potencial em um campo uniforme (faça você mesmo essas passagens algébricas para chegar nesta expressão):

$$V_{AB} = Ed$$

Essa equação revela que, para um campo uniforme, percorrendo-se uma linha de força no seu sentido, a diferença de potencial elétrico é diretamente proporcional à distância percorrida, implicando uma redução linear do potencial elétrico. Se o campo elétrico da figura 2 for igual a 50 N/C e a distância d for 10 cm, o potencial V_B será 5,0 V abaixo de V_A, pois V_{AB} = 50.0,10 = 5,0 V. Se a distância d fosse o dobro, o potencial de V_B seria 10 V abaixo de V_A, e assim por diante.

A figura 3 ilustra uma experiência para confirmar esse comportamento do potencial elétrico em um campo uniforme, gerado por duas placas uniformemente eletrizadas e ligadas a uma bateria de 9 V. O potencial elétrico é avaliado com a ajuda de um instrumento de medidas elétricas chamado voltímetro. Nesse experimento, um líquido resistivo é posto entre as placas. A baixa condutividade desse fluido dificulta o descarregamento das placas, mas garante o contato elétrico entre os terminais do voltímetro. O princípio de funcionamento desse medidor será visto em outro módulo desta Coleção.

a)

b)

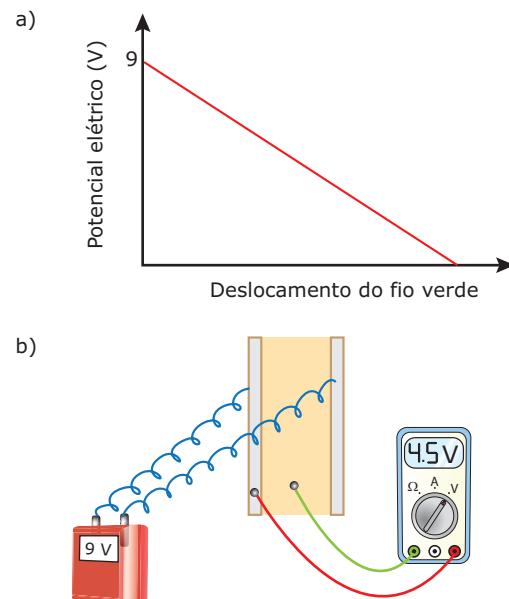



Figura 3: (a) Gráfico mostrando a redução linear do potencial elétrico em um campo elétrico uniforme; (b) aparato para mapeamento do potencial elétrico.

PARA REFLETIR

Em um dia seco, duas pessoas estendem suas mãos para se cumprimentarem e, pouco antes do toque, uma centelha salta entre as pontas das mãos das pessoas. Isso ocorre porque a voltagem entre as mãos é de alguns milhares de volts. Sendo essa voltagem tão alta, por que ela não causa um choque fatal?

SUPERFÍCIES EQUIPOTENCIAIS

Em torno de uma fonte de campo e potencial elétrico, como uma esfera ou uma placa eletrizada, existem certas superfícies onde o potencial elétrico é constante. Por isso, elas são chamadas de superfícies equipotenciais. O conhecimento dessas superfícies lhe permitirá entender com mais clareza muitos problemas de Eletrostática. Antes de estudarmos as superfícies de potenciais elétricos constantes, será instrutivo discutirmos uma situação relativa às superfícies equipotenciais de um campo gravitacional.

Superfícies equipotenciais gravitacionais

Considere um livro de massa m sobre uma mesa de altura h, como mostra a figura 4. Vamos usar essa figura para quantificar o potencial gravitacional e analisar algumas superfícies equipotenciais relacionadas com essa situação.

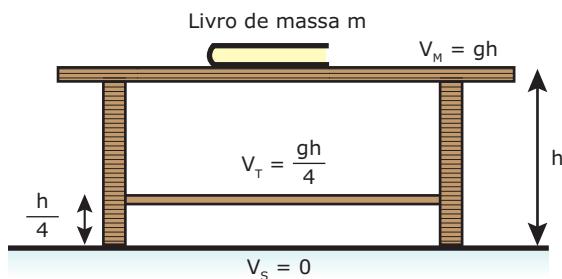



Figura 4: Níveis de potencial gravitacional constante no campo gravitacional da Terra.

Se esse livro cair, o campo gravitacional realizará sobre ele um trabalho dado por mgh (g é a aceleração da gravidade). Semelhantemente à definição para a diferença de potencial elétrico, podemos definir a diferença de potencial gravitacional por meio da razão entre o trabalho gravitacional e a massa do objeto em queda. Aplicando essa definição, podemos obter uma expressão para calcular a diferença de potencial gravitacional entre a superfície da mesa (M) e o solo (S):

$$V_{MS} = V_M - V_S = \frac{mgh}{m} = gh$$

Nessa equação, note que a diferença de potencial gravitacional V_{MS} não depende da massa do livro, da mesma forma que a diferença de potencial elétrico não depende da carga de prova. Se o solo for considerado como o nível de potencial gravitacional zero, o potencial gravitacional da mesa será dado por $V_M = gh$. Essa expressão pode ser usada para calcular o potencial gravitacional de qualquer ponto próximo à superfície da Terra (desde que g possa ser considerado constante). Por isso, se o travessão fixado nos pés da mesa estiver a uma altura h/4 do solo, o potencial gravitacional nesse nível será $V_T = gh/4$, como está indicado na figura anterior.

A superfície da mesa é uma superfície equipotencial, pois todos os seus pontos encontram-se à mesma altura em relação ao solo, logo, se acham no mesmo potencial gh. O solo é outra superfície equipotencial, de potencial gravitacional zero. O plano horizontal que passa pelo travessão da mesa é uma terceira superfície equipotencial, de potencial gh/4.

Entre as características das superfícies equipotenciais, as três seguintes devem ser destacadas:

1) Uma superfície equipotencial é perpendicular às linhas de força do campo a ela associado.
2) Quando um corpo de prova se move entre duas superfícies equipotenciais, o trabalho realizado pela força exercida por esse campo independe da trajetória que o corpo segue.
3) Quando um corpo de prova se move entre dois pontos pertencentes à mesma superfície equipotencial, o trabalho realizado pela força desse campo vale zero.

A primeira característica pode ser constatada observando que as superfícies equipotenciais gravitacionais são paralelas ao solo horizontal (uma laje, o tampo de uma mesa, etc.) e esta superfície é perpendicular às linhas de força do campo gravitacional.

A segunda característica é uma consequência da equação $V_{AB} = W_{AB}/q$ (ou m). Nessa expressão, vemos que o trabalho depende apenas da própria carga (ou massa, no caso gravitacional) e da diferença de potencial $V_A - V_B$. O primeiro potencial é o do ponto A (local de partida), que se acha sobre uma superfície equipotencial de potencial V_A. O outro potencial é o do ponto B (local de chegada), situado sobre uma superfície de potencial V_B. O caminho entre esses dois pontos (ou entre essas duas superfícies) é, portanto, irrelevante. O trabalho realizado pela força elétrica (ou pela força gravitacional) independe da trajetória.

A terceira característica das superfícies equipotenciais é também uma consequência da equação $V_{AB} = W_{AB}/q$ (ou m). Se os pontos A e B acham-se sobre a mesma superfície equipotencial, então $V_A = V_B$. Logo, V_{AB} e W_{AB} valem zero. Podemos ainda afirmar que o trabalho é zero simplesmente porque a força exercida pelo campo, sobre um corpo que se desloca sobre uma superfície equipotencial, atua perpendicularmente ao deslocamento. Por exemplo, se o livro da figura anterior se deslocar de um ponto A para um ponto B, ambos sobre a mesa, o seu peso, sendo perpendicular à mesa (superfície equipotencial), não realizará nenhum trabalho.

Superfícies equipotenciais elétricas

Agora, vamos analisar as superfícies equipotenciais de um campo elétrico. As características discutidas anteriormente também se aplicam a esse caso. Por isso, as superfícies equipotenciais de um campo elétrico uniforme são planos perpendiculares às linhas de força desse campo. Observe os dois planos verticais que passam pelos pontos A e B na figura 5. Esses planos são vistas laterais de superfícies equipotenciais; a primeira apresenta o potencial elétrico V_A, enquanto a segunda acha-se no potencial V_B.

A figura 5 mostra uma visão tridimensional de superfícies equipotenciais de um campo elétrico uniforme. Observe que os potencias elétricos decrescem de quantidades iguais porque as superfícies equipotenciais mostradas na figura acham-se igualmente espaçadas. Isso está de acordo com a expressão V = Ed para a queda de potencial em um campo uniforme.

Agora, observe os caminhos AB e ACB indicados nessa figura. Uma carga q receberá a mesma quantidade de energia do campo elétrico (o mesmo trabalho), independentemente de ela seguir o primeiro ou o segundo caminho, pois o trabalho independe da trajetória. Esse trabalho é dado por $W_{AB} = qV_{AB}$. A diferença de potencial V_{AB} vale 10 V para os dois casos. Se q for igual a 2,0 μC, o trabalho W_{AB} será 20 μJ. No trajeto ACB, você saberia explicar por que $W_{AC} = 0$ e $W_{CB} = 20\ \mu$J?

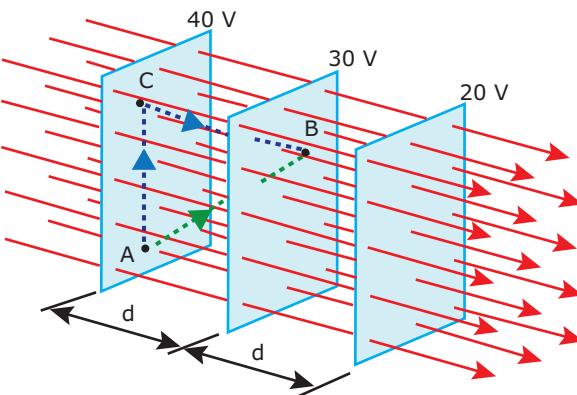



Figura 5: Visão em três dimensões de superfícies equipotenciais de um campo elétrico uniforme.

Como último exemplo deste tópico, observe a figura 6, que mostra o mapa do campo e do potencial elétrico gerados por uma nuvem eletrizada positivamente (não mostrada na figura). A nuvem está eletrizada, pois ela induziu uma carga negativa no solo e no corpo do rapaz. As linhas dirigidas para baixo são as linhas de força do campo elétrico, enquanto as linhas tracejadas são cortes laterais das superfícies equipotenciais desse campo. Observe que as superfícies equipotenciais são perpendiculares às linhas de força. Observe ainda o decrescimento do potencial elétrico no sentido das linhas de força. O valor zero para o potencial do solo foi arbitrado. Esse potencial poderia ter sido fixado em −100 V, por exemplo. Nesse caso, a primeira superfície de baixo para cima seria de 0 V, a segunda de +100 V, e assim por diante. O importante é que as diferenças de potencial elétrico entre as superfícies equipotenciais permaneceriam inalteradas.

Observe que o rapaz dessa figura está segurando um pente. Considere que o pente apresenta uma carga positiva q = 0,20 μC. Se o rapaz o elevar desde a superfície equipotencial de +100 V até a superfície de +200 V, o campo elétrico realizará sobre o pente um trabalho de −20 μJ. Calcule você mesmo esse valor e explique por que ele é negativo (observe o sentido da força elétrica que atua sobre o pente e o sentido do seu deslocamento).

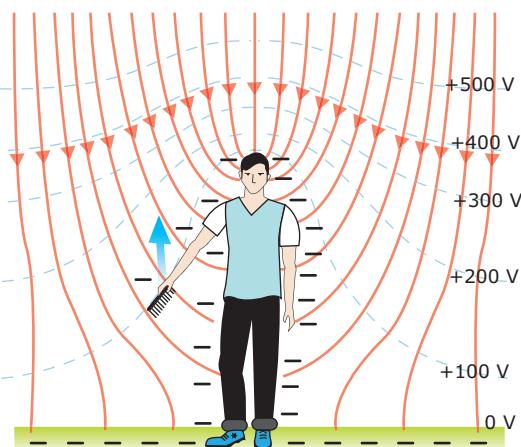
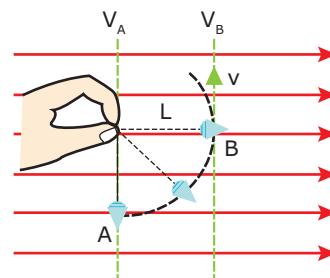



Figura 6: Campo e potencial elétrico gerados por uma nuvem eletrizada positivamente.

PARA REFLETIR

Por que duas superfícies equipotenciais diferentes não podem se interceptar?

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Uma pequena pedra de massa m e carga +q está suspensa por um fio isolante de comprimento L e acha-se em repouso no ponto A. Subitamente, aplica-se um campo elétrico uniforme voltado para a direita, como mostra a figura a seguir. Calcular a velocidade v da pedra no ponto B em função de m, q, L e V_{AB} (diferença de potencial elétrico entre os pontos A e B).

Resolução:

Como a carga é positiva, a força elétrica sobre a pedra está no mesmo sentido do campo elétrico. A ação dessa força impulsiona a pedra sempre para a direita. Presa no fio, a pedra descreve o arco de circunferência mostrado na figura. A velocidade da pedra no ponto B pode ser calculada por meio da relação entre o trabalho da força resultante e a variação da energia cinética da pedra:

$$\Delta E_C = W_R \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2}mv^2 = W_P + W_E$$

Nessa expressão, W_P é o trabalho realizado pela força gravitacional, e W_E é o trabalho realizado pela força elétrica. O trabalho da força exercida pelo fio sobre a pedra é nulo, pois essa força age sempre perpendicularmente à trajetória circular. O trabalho gravitacional é dado por:

$W_P = -mgL$, em que g é a aceleração da gravidade.

O sinal negativo se deve ao fato de a força peso se opor ao deslocamento da pedra. O trabalho elétrico pode ser calculado por:

$$W_E = V_{AB}q$$

Substituindo esses dois trabalhos na relação envolvendo a energia cinética da pedra, obtemos a velocidade v:

$$\frac{1}{2}mv^2 = -mgL + V_{AB}.q \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2V_{AB}q}{m} - 2gL}$$

POTENCIAL ELÉTRICO DE UMA CARGA PONTUAL

Neste item, vamos analisar o potencial elétrico em volta de uma carga pontual. Observe a figura 7, que mostra uma carga pontual $Q > 0$ fixa sobre um suporte isolante. Uma carga de prova $q > 0$, abandonada no ponto A, é repelida por Q e move-se em direção ao ponto B. O potencial em A é maior que o potencial em B, porque as linhas de força do campo elétrico de Q são dirigidas de A para B. Como q é positiva, ela se move espontaneamente em direção aos potenciais menores.

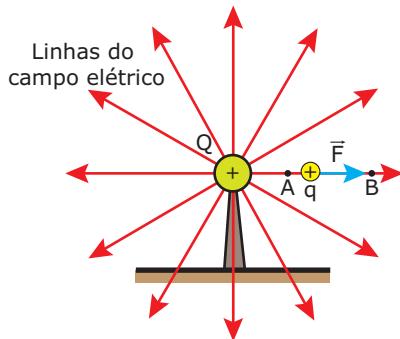



Figura 7: Diferença de potencial elétrico entre pontos próximos a uma carga pontual.

Podemos calcular a diferença de potencial elétrico entre os pontos A e B dividindo o trabalho realizado pela força elétrica que age na carga de prova no deslocamento AB pelo valor da própria carga q:

$$V_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$$

Nesse deslocamento, o módulo da força elétrica diminui à medida que a carga q se afasta da carga Q, de acordo com a Lei de Coulomb. Por isso, o trabalho não pode ser calculado por meio do produto simples entre a força e o deslocamento. A figura 8 mostra o gráfico da força elétrica em função da distância da carga q à carga Q. Neste diagrama, F_A é o módulo da força que a carga Q exerce sobre a carga q quando esta se acha no ponto A, cuja distância até a carga Q vale r_A. No ponto B, esses valores são F_B e r_B.

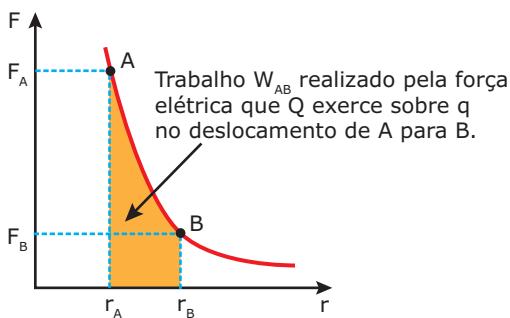



Figura 8: A área sob a curva do gráfico da força versus *o deslocamento é numericamente igual ao trabalho realizado por essa força.*

Da Mecânica, sabemos que a área destacada no gráfico da figura anterior é numericamente igual ao trabalho realizado pela força elétrica exercida por Q sobre a carga de prova q, no deslocamento de A para B. Essa área pode ser calculada por meio de uma operação matemática conhecida como integração (essa técnica matemática não faz parte do programa do Ensino Médio e dos programas de vestibulares em nosso país). Para nosso objetivo, basta saber que essa técnica fornece a seguinte expressão para essa área (trabalho W_{AB}):

$$W_{AB} = KQq\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$$

Substituindo esse trabalho na definição para a diferença de potencial elétrico, obtemos a seguinte expressão para o cálculo da diferença de potencial entre dois pontos A e B, gerada por uma carga pontual:

$$V_A - V_B = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{KQq}{q}\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$$

$$V_A - V_B = KQ\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$$

Como a carga de prova se move para potenciais mais baixos, é coerente considerar que o potencial de um ponto B infinitamente afastado seja zero ($V_B = 0$). Nesse caso, a razão $1/r_B$ também tende a zero. Assim, o potencial elétrico do ponto A pode ser calculado por:

$$V = \frac{KQ}{r}$$

Nessa equação, omitimos o índice A para que a expressão assuma um caráter mais geral. Assim, ela fornece o potencial de um ponto qualquer situado a uma distância r de uma carga pontual Q. Para pontos próximos à carga, o módulo do potencial é alto. Para pontos distantes, o módulo é baixo, tendendo a zero para pontos infinitamente afastados.

No desenvolvimento da equação anterior, usamos como exemplo uma carga pontual ($Q > 0$). Não há nenhuma restrição quanto ao uso da equação, caso a carga seja negativa. O único cuidado que deve ser tomado é o de colocar o sinal negativo da carga quando você for substituir valor de Q na equação do potencial elétrico. Por exemplo, o potencial elétrico, gerado por uma carga $Q = -1{,}0\ \mu C$, imersa no ar e a uma distância $r = 9{,}0$ m, vale $V = -1{,}0 \times 10^3$ volts (faça você mesmo os cálculos, lembrando que $K = 9{,}0 \times 10^9\ Nm^2/C^2$ para o ar).

O gráfico do potencial de uma carga pontual em função da distância a essa carga é uma hipérbole. Dependendo do sinal da carga (de módulo igual a 60 μC), o gráfico pode apresentar um dos dois aspectos mostrados na figura a seguir.

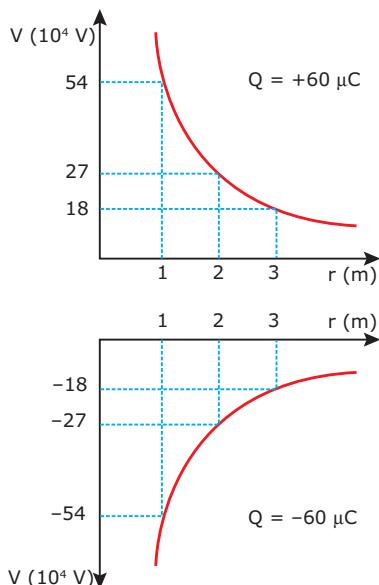



Figura 9: Potencial elétrico de uma carga pontual em função da distância.

Observe que o potencial elétrico é inversamente proporcional à distância à carga, ou seja, o potencial elétrico diminui com o aumento da distância à carga. Essa lei inversa também está ilustrada na figura seguinte, que mostra algumas superfícies equipotenciais em torno de uma carga negativa pontual –Q.

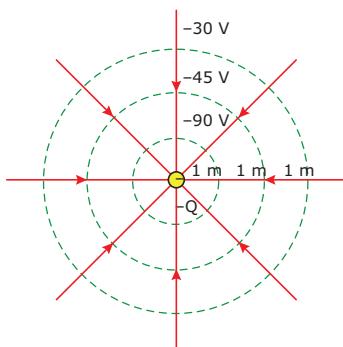



Figura 10: Superfícies equipotenciais em torno de uma carga pontual negativa –Q.

ENERGIA POTENCIAL ELÉTRICA

A figura 11 mostra a superfície de uma mesa uniformemente eletrizada com carga negativa. O campo elétrico decorrente dessa distribuição de cargas é uniforme, com as linhas de força dirigidas de cima para baixo. As superfícies equipotenciais são planas e paralelas à mesa. Algumas estão mostradas na figura. Uma pedra eletrizada positivamente encontra-se próxima à mesa, suspensa por um fio isolante. A massa e a carga da pedra são m e q, respectivamente.

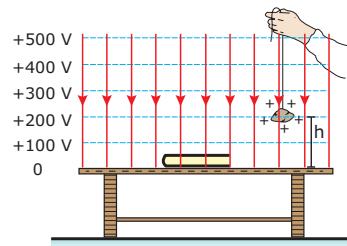



Figura 11: Energia potencial gravitacional e elétrica.

Quando a pedra é erguida contra o campo gravitacional, ela ganha energia potencial gravitacional. O potencial gravitacional pode ser calculado por gh (aceleração da gravidade vezes a altura da pedra em relação à mesa). Além disso, a energia potencial gravitacional da pedra é dada por mgh. Portanto, a energia potencial gravitacional pode ser interpretada como o produto entre a massa e o potencial gravitacional.

A pedra eletrizada imersa no campo elétrico da mesa também possui energia potencial elétrica. Semelhantemente ao caso gravitacional, a energia potencial elétrica pode ser calculada por meio do produto entre o potencial elétrico e a carga da pedra.

Na posição mostrada na figura, a pedra acha-se no potencial de +200 V, e a sua energia potencial elétrica é E_{PE} = (+200 V.q). Se a pedra for erguida, ela ganhará energia potencial elétrica. Se a pedra for solta, a sua energia potencial se transformará em energia cinética. A energia potencial é a soma da parcela gravitacional com a parcela elétrica. Se a pedra for solta de uma altura h = 20 cm em relação à mesa, considerando m = 0,50 kg e q = +20 mC, a velocidade da pedra quando ela bater na mesa será:

$$\frac{1}{2}mv^2 = Vq + mgh \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2Vq}{m} + 2gh}$$

$$v = \sqrt{\frac{2.200.20 \times 10^{-3}}{0,50} + 2.10.0,20} = 4,5 \text{ m/s}$$

O exercício resolvido 01, apresentado anteriormente, é um exemplo parecido com esse caso. Naquele problema, a solução foi baseada na transformação de trabalho em energia cinética. Naquele caso, a equação que obtivemos para a velocidade apresentou a parcela relativa à gravidade negativa porque o corpo moveu-se contra o campo gravitacional.

Finalizaremos este módulo apresentando a equação para calcular a energia potencial elétrica de um sistema formado por duas cargas pontuais. A figura 12 mostra uma situação desse tipo. O sistema formado pelas duas cargas pontuais possui energia potencial elétrica. Se uma das cargas for solta, a energia potencial elétrica do sistema se converterá em energia cinética.

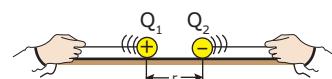



Figura 12: Energia potencial elétrica armazenada em duas cargas pontuais.

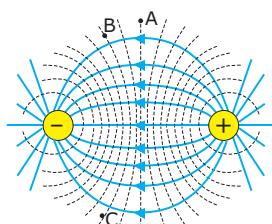
FÍSICA

Podemos deduzir uma expressão para a energia potencial elétrica desse sistema usando o que aprendemos na discussão da figura 12: a energia potencial elétrica de uma carga é igual ao produto do valor da carga pelo potencial elétrico da posição em que ela se encontra. Por exemplo, o potencial elétrico gerado pela carga Q_1, no local onde se acha a carga Q_2, é dado por:

$$V_1 = \frac{KQ_1}{r}$$

Então, V_1 vezes a carga Q_2 é a energia potencial elétrica da carga Q_2 em relação à carga Q_1:

$$E_{PE} = \frac{KQ_1}{r}Q_2 = \frac{KQ_1Q_2}{r}$$

Se uma das cargas for liberada (por exemplo, se o fio que prende a carga Q_2 se romper), a força de atração a puxará em direção à outra carga. A energia E_{PE} se tornará maior em módulo, pois a distância r entre as cargas irá diminuir à medida que a carga livre se aproximar da carga fixa. Entretanto, de fato, essa energia diminuirá, porque ela é negativa, uma vez que o produto Q_1Q_2 é negativo. A diminuição de E_{PE} implicará no aumento da energia cinética da carga liberada.

Para um sistema com várias cargas, a energia potencial elétrica é calculada da seguinte forma: primeiramente, calculamos as energias potenciais das cargas tomadas duas a duas, em arranjo. Depois, somamos essas parcelas para obter a energia do conjunto. Para o caso de três cargas Q_1, Q_2 e Q_3, por exemplo, a energia do conjunto é dada por:

$$E_{PE} = \frac{KQ_1Q_2}{r_{12}} + \frac{KQ_1Q_3}{r_{13}} + \frac{KQ_2Q_3}{r_{23}}$$

Nessa expressão, r_{12} é a distância entre as cargas Q_1 e Q_2, e assim por diante. Para $E_{PE} > 0$, o sistema é repulsivo, isto é, as cargas afastam-se entre si quando liberadas. Ao contrário, para $E_{PE} < 0$, o sistema é atrativo (caso da figura 12).

EXERCÍCIO RESOLVIDO

02. A figura mostra o mapa de campo elétrico de um dipolo elétrico constituído por duas cargas de sinais opostos e módulos iguais a 60 μC. Considere o ponto A mostrado na figura, que se acha sobre a superfície equipotencial simétrica em relação às cargas. Considere também os pontos B e C, situados sobre uma mesma superfície equipotencial, sendo que os dois se acham a 1,0 m da carga negativa e a 2,0 m da carga positiva. Calcular o trabalho que o campo elétrico realiza quando uma carga de prova q = −2,0 μC é levada do ponto A ao ponto B. Calcular o trabalho se a carga for levada, a seguir, do ponto B ao ponto C.

Resolução:

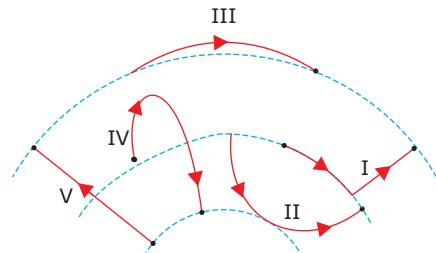
Primeiro, vamos calcular o potencial elétrico do ponto A. Esse valor é a soma dos potenciais que a carga positiva e a carga negativa do dipolo criam no ponto A. Como as distâncias de A até essas cargas são iguais, e como as cargas possuem módulos iguais e sinais opostos, concluímos que os potenciais elétricos gerados pelas cargas no ponto A têm mesmo módulo e são opostos. Assim, o potencial elétrico resultante no ponto A vale zero (essa resultante é a soma algébrica dos potenciais individuais, porque o potencial é uma grandeza escalar). Simbolicamente:

$$V_A = 0$$

Agora, vamos calcular os potenciais elétricos dos pontos B e C. Naturalmente, esses potenciais são iguais, pois B e C acham-se sobre a mesma superfície equipotencial. O potencial em B e em C, criado pela carga +60 μC (r = 2,0 m) e pela carga −60 μC (r = 1,0 m), pode ser calculado por:

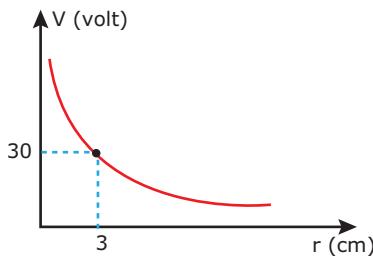
$$V_B = V_C = 9{,}0 \times 10^9\left(\frac{60 \times 10^{-6}}{2{,}0} - \frac{60 \times 10^{-6}}{1{,}0}\right)$$

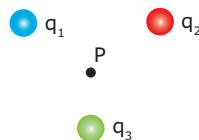
$$V_B = V_C = -2{,}7 \times 10^5 \text{ volts}$$

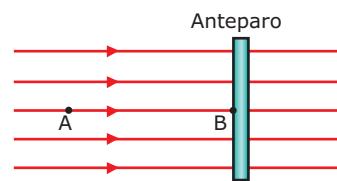
Com esses valores, podemos calcular o trabalho elétrico realizado sobre a carga q = −2,0 μC que se desloca de A para B. Usando a definição de diferença de potencial elétrico, temos:

$$W_{AB} = (V_A - V_B)q = [0 - (-2{,}7 \times 10^5)(-2 \times 10^{-6})]$$

$$W_{AB} = -5{,}4 \times 10^{-1} \text{ J} = -0{,}54 \text{ J}$$

O trabalho no deslocamento de B para C vale zero, pois esses pontos acham-se sobre a mesma superfície equipotencial, $V_{BC} = 0$.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (UNIFESP–2006 / Adaptado) Na figura, as linhas tracejadas representam superfícies equipotenciais de um campo elétrico; as linhas cheias I, II, III, IV e V representam cinco possíveis trajetórias de uma partícula de carga q, positiva, realizadas entre dois pontos dessas superfícies, sob a ação da força elétrica gerada pelo campo.

A trajetória em que o trabalho é maior, em módulo, é

A) I.
B) II.
C) III.
D) IV.
E) V.

02. (UFLA-MG–2006) O diagrama potencial elétrico *versus* distância de uma carga elétrica puntiforme Q no vácuo é mostrado a seguir. Considere a constante eletrostática do vácuo $K_0 = 9,0 \times 10^9$ Nm²/C². Pode-se afirmar que o valor de Q é

A) $+3,0 \times 10^{-12}$ C.

B) $+0,1 \times 10^{-12}$ C.

C) $+3,0 \times 10^{-9}$ C.

D) $+0,1 \times 10^{-9}$ C.

E) $-3,0 \times 10^{-12}$ C.

03. (FMTM-MG) Na figura, estão representadas três cargas elétricas pontuais, $q_1 > 0$, $q_2 < 0$ e $q_3 < 0$, isoladas e imersas no vácuo, e um ponto P. O potencial elétrico no ponto P criado pelas

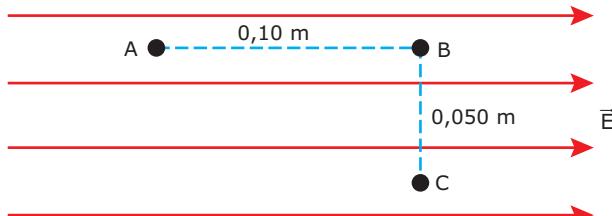
A) três cargas elétricas é calculado somando-se algebricamente os potenciais elétricos devidos às cargas q_1, q_2 e q_3.

B) três cargas elétricas é calculado somando-se vetorialmente os potenciais elétricos devidos às cargas q_1, q_2 e q_3.

C) três cargas elétricas é calculado somando-se os módulos dos potenciais elétricos devidos às cargas q_1, q_2 e q_3.

D) cargas elétricas q_2 e q_3 é zero, independentemente do valor da carga elétrica q_1.

E) cargas elétricas q_1, q_2 e q_3 é zero, devido à posição das cargas em relação ao ponto P.

04. (Mackenzie-SP–2007) Uma partícula de massa 2,0 g, eletrizada com carga elétrica positiva de 20 μC, é abandonada do repouso no ponto A de um campo elétrico uniforme, cujo potencial elétrico é 250 V. Essa partícula adquire movimento e se choca em B, com o anteparo rígido e fixo a 80 cm do ponto A. O potencial elétrico do ponto B é de 50 V. O choque entre a partícula e o anteparo tem coeficiente de restituição igual a 0,80. A distância do anteparo em que essa partícula vai parar será

Informação:

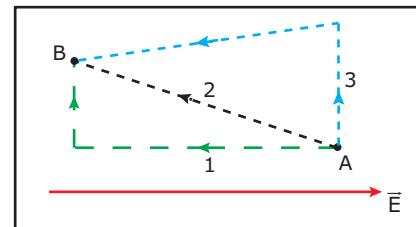
$$\text{Coeficiente de restituição} = \frac{\text{Velocidade de retorno}}{\text{Velocidade de impacto}}$$

A) 42,3 cm.

B) 46,6 cm.

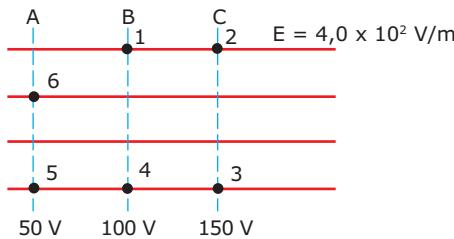
C) 49,8 cm.

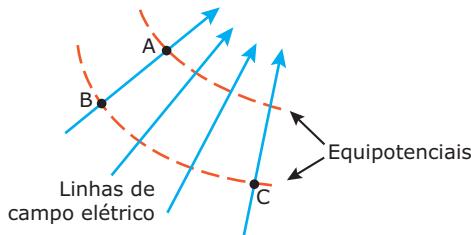
D) 51,2 cm.

E) 54,0 cm.

05. (UFOP-MG) O campo elétrico em uma dada região é uniforme e tem módulo E = 100 N/C, como mostra a figura a seguir.

A) **DETERMINE** a diferença de potencial entre os pontos A e B, B e C e A e C.

B) **DETERMINE** a força elétrica que age sobre uma carga pontual $q = 1,0 \times 10^{-6}$ C, colocada no ponto A deste campo. **DETERMINE** o trabalho realizado por um agente externo para conduzir essa carga com velocidade constante de A até C.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (CEFET-MG–2010) Um elétron desloca-se entre os pontos A e B, segundo as trajetórias 1, 2 e 3, representadas na figura a seguir, ao ser colocado em uma região onde existe um campo elétrico uniforme, dirigido da esquerda para direita.

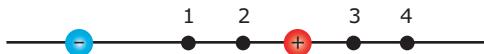
Os trabalhos W_1, W_2 e W_3, realizados pela força elétrica ao longo dos percursos 1, 2 e 3, estão relacionados por

A) $W_1 = W_2 = W_3$.

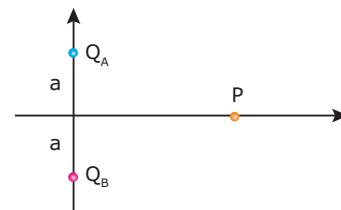
B) $W_1 = W_2 < W_3$.

C) $W_1 > W_2 = W_3$.

D) $W_1 < W_2 < W_3$.

E) $W_1 > W_2 > W_3$.

02. (PUC Minas–2007) A figura mostra um campo elétrico uniforme e três superfícies equipotenciais, representadas por A, B e C. Considerando-se o módulo do campo elétrico como $4,0 \times 10^2$ V/m, então o trabalho necessário para se levar uma carga $q = 1,0 \times 10^{-6}$ C do ponto 2 até o ponto 6 pela trajetória retilínea 256 será de

A) $W = 4,0 \times 10^{-4}$ J.
B) $W = 1,0 \times 10^{-4}$ J.
C) $W = 6,0 \times 10^{-5}$ J.
D) $W = 8,0 \times 10^{-5}$ J.

03. (Unimontes-MG) Quando uma partícula de carga $q < 0$ se move de A para B, ao longo da linha de campo elétrico, como mostrado na figura, o campo elétrico realiza sobre ela um trabalho W_0. As diferenças de potencial elétrico $(V_B - V_A)$, $(V_C - V_A)$ e $(V_C - V_B)$ são, respectivamente,

A) W_0/q, W_0/q, 0.
B) 0, 0, W_0/q.
C) W_0/q, 0, 0.
D) W_0/q, W_0/q, W_0/q.

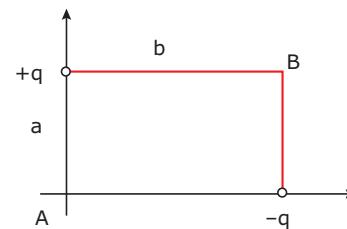
04. (UFMS–2006 / Adaptado) Um dipolo elétrico é constituído por uma carga positiva e uma negativa (veja a figura). O ponto 1 está equidistante das cargas, os pontos 2 e 3 estão equidistantes da carga positiva e o ponto 4 possui a mesma distância que o ponto 1 da carga positiva. Qual(is) das afirmações a seguir é(são) **CORRETA(S)**?

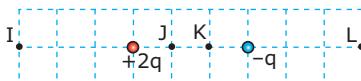
( ) O trabalho para um agente externo trazer uma carga de prova do infinito até o ponto 1 é nulo.

( ) O trabalho para um agente externo trazer uma carga de prova do infinito até o ponto 2 é maior que para trazer a carga de prova até o ponto 3.

( ) O campo elétrico no ponto 1 é nulo.

( ) O potencial elétrico no ponto 3 é igual ao potencial elétrico no ponto 2.

( ) O trabalho para um agente externo trazer a carga do ponto 4 para o ponto 3 é igual ao trabalho para trazer a carga do ponto 2 ao ponto 1.

05. (UFMS) Duas cargas elétricas fixas puntiformes Q_A e Q_B de massas m_A e m_B, respectivamente, localizadas sobre um eixo vertical, estão separadas por uma distância 2a, simetricamente dispostas em relação à origem do sistema de eixos ortogonais, conforme a figura seguinte. Tomando-se sobre o eixo horizontal um ponto P de coordenadas (x = 0) e considerando que não há nenhuma carga elétrica ou massa nula, é **CORRETO** afirmar que

01. se $Q_A + Q_B = 0$, o potencial elétrico resultante, gerado pelas duas cargas no ponto P, será nulo.
02. o potencial gravitacional resultante, gerado pelas duas massas no ponto P, será nulo.
04. se $Q_A + Q_B = 0$, o campo elétrico resultante, gerado pelas duas cargas no ponto P, será nulo.
08. o campo gravitacional resultante, gerado pelas duas massas, terá o sentido oposto ao eixo vertical se as duas massas forem iguais.
16. o campo elétrico resultante, gerado pelas duas cargas, terá o sentido oposto ao eixo horizontal se as duas cargas forem iguais e negativas.

Soma ( )

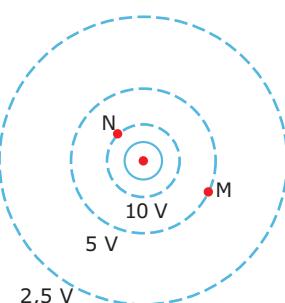
06. (UEM-PR) Duas cargas puntiformes +q e −q são mantidas, em equilíbrio, nos vértices do retângulo de lados a = 3 m e b = 4 m, conforme a figura. Considere a constante de Coulomb K e o potencial V = 0 no infinito. Nessas condições, assinale o que for **CORRETO**.

01. O potencial no ponto B é maior que o potencial no ponto A, ou seja, $V_B > V_A$.
02. No cruzamento das diagonais do retângulo, o potencial é nulo. Porém, o campo elétrico é diferente de zero.
04. $V_A - V_B = Kq/6$ (em volts).
08. O trabalho necessário para deslocar uma terceira carga q', em equilíbrio, de A até B, é igual à energia potencial do sistema formado pelas três cargas.
16. O campo elétrico resultante, no ponto A, é igual ao campo elétrico resultante, no ponto B.
32. $(V_A - V_B) \neq (V_B - V_A)$.

Soma ( )

07. (UFRGS–2007) A figura a seguir representa duas cargas elétricas puntiformes, mantidas fixas em suas posições, de valores +2q e –q, sendo q o módulo de uma carga de referência.

Considerando-se zero o potencial elétrico no infinito, é **CORRETO** afirmar que o potencial elétrico criado pelas duas cargas será zero também nos pontos

A) I e J.
B) I e K.
C) I e L.
D) J e K.
E) K e L.

08. (UEL-PR) Um elétron escapa da placa negativa de um capacitor, com velocidade inicial desprezível. Se a diferença de potencial entre as placas do capacitor é de 200 V e a carga elementar é de $1,6 \times 10^{-19}$ C, a energia cinética com que o elétron atinge a placa positiva é, em joules,

A) $3,2 \times 10^{-23}$.
B) $8,0 \times 10^{-22}$.
C) $3,2 \times 10^{-21}$.
D) $8,0 \times 10^{-18}$.
E) $3,2 \times 10^{-17}$.

09. (PUC Minas / Adaptado) A energia potencial elétrica existente entre duas cargas puntiformes separadas por certa distância ficará inalterada se

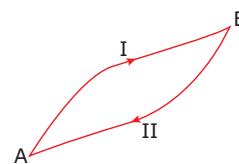
A) as cargas forem mantidas e a distância dividida por dois.
B) cada carga for dobrada e a distância também.
C) uma das cargas for dobrada e a distância multiplicada por quatro.
D) cada carga for quadruplicada e a distância dividida por dois.
E) cada carga for dobrada e a distância multiplicada por quatro.

10. (UNESP–2008) A figura é a interseção de um plano com o centro C de um condutor esférico e com três superfícies equipotenciais ao redor desse condutor.

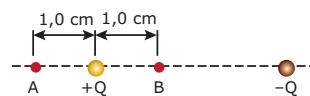
Uma carga de $1,6 \times 10^{-19}$ C é levada do ponto M ao ponto N. O trabalho realizado para deslocar essa carga foi de

A) $3,2 \times 10^{-20}$ J.
B) $16,0 \times 10^{-19}$ J.
C) $8,0 \times 10^{-19}$ J.
D) $4,0 \times 10^{-19}$ J.
E) $3,2 \times 10^{-18}$ J.

11. (Unimontes-MG–2007) Nos vértices de um triângulo equilátero de lado L, são colocadas três cargas puntiformes Q positivas e iguais. Sendo K a constante de Coulomb, a energia potencial eletrostática (E_{Pe}) do sistema é dada por

A) $E_{pe} = 3KQ^2/L$.
B) $E_{pe} = 2KQ^2/L$.
C) $E_{pe} = KQ^2/2L$.
D) $E_{pe} = KQ/L$.

12. (Unimontes-MG–2010) Uma carga Q = 2 C está num ponto A do espaço onde existe um campo elétrico. O trabalho realizado pela força elétrica, para deslocar essa carga do inifinito até o ponto A, é igual a W. Se o potencial elétrico no ponto A é 30 V, o módulo do trabalho W vale

A) 40 J.
B) 30 J.
C) 60 J.
D) 50 J.

13. (Mackenzie-SP–2006) Uma unidade de medida de energia muito utilizada em Física Nuclear é o elétron-volt (eV), os múltiplos quilo elétron-volt (keV) e mega elétron-volt (MeV) são ainda mais usuais. Comparando o elétron-volt com a unidade de medida do Sistema Internacional, temos que 1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ J. Durante uma experiência no laboratório, tem-se uma carga elétrica puntiforme fixa (Q) de 3,0 nC ($3,0 \times 10^{-9}$ C), praticamente no vácuo ($K_0 = 9 \times 10^9$ Nm²/C²), e, num determinado instante, um pósitron ($q = +1,6 \times 10^{-19}$ C) é abandonado do repouso num ponto A, distante 3,0 mm dessa carga Q. Ao passar por um ponto B, situado a 6,0 mm de A, sobre a mesma reta QA, o pósitron terá energia cinética de

A) 4,5 keV.
B) 6,0 keV.
C) 9,0 keV.
D) 4,5 MeV.
E) 6,0 MeV.

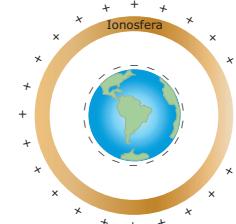
14. (UFRRJ–2007) Uma carga elétrica $q = 1,0 \times 10^{-6}$ C se movimenta em uma região onde existe um campo eletrostático uniforme. Essa carga parte de um ponto A, cujo potencial elétrico é $V_A = 2$ V, e caminha pelo percurso (I) até um ponto B, onde o potencial elétrico é $V_B = 4$ V.

A) **CALCULE** o trabalho realizado pela força elétrica que atua sobre a carga ao longo do deslocamento de A a B.

B) Supondo que a carga retorne ao ponto A pelo caminho (II), **DETERMINE** o trabalho total realizado pela força elétrica ao longo do percurso de ida e volta, (I) + (II).

15. (UFPE–2008) Duas cargas elétricas puntiformes, de mesmo módulo Q e sinais opostos, acham-se fixas à distância de 3,0 cm entre si. **DETERMINE** o potencial elétrico no ponto A, em volts, considerando que o potencial no ponto B é de 60 volts.

SEÇÃO ENEM

01. *Um raio ou relâmpago é uma descarga elétrica entre nuvens de chuva ou entre essas nuvens e a terra. A descarga é visível a olho nu e apresenta formas e ramificações sinuosas. Existem três tipos de raios: da nuvem para o solo, do solo para a nuvem e entre nuvens. Um raio principia quando o campo elétrico atinge 3,0 x 106 N/C, valor conhecido como rigidez dielétrica do ar. Nesse momento, a voltagem inicial entre as partes envolvidas atinge valores muito elevados.*

Disponível em: <http://www.wikipedia.org>
Acesso em: 10 dez. 2010. (Adaptação).

Sobre as voltagens nos três tipos de raios citados, marque a afirmativa correta.

A) Em um raio entre o solo e uma nuvem de altitude 1 km, a voltagem inicial é da ordem de milhões de volts.
B) Em um raio da nuvem para o solo, a voltagem inicial é maior que aquela em um raio do solo para a nuvem.
C) Em todo raio, a voltagem entre as partes envolvidas aumenta progressivamente durante a ocorrência do fenômeno.
D) Em um raio da nuvem para o solo, a voltagem inicial é maior que aquela em um raio entre nuvens próximas.
E) Em todo raio, a voltagem entre as partes envolvidas é igual a zero nos instantes que antecedem o fenômeno.

02. Um modelo simples da distribuição de cargas elétricas na Terra e em sua atmosfera é mostrado na figura a seguir. Perto da superfície terrestre, existe um campo elétrico radial para baixo, de aproximadamente 100 V/m, devido ao fato de a superfície ter cargas negativas e a ionosfera ter cargas positivas. Como a atmosfera não é um isolante perfeito, ela é atravessada por um fluxo de íons positivos para baixo e por um fluxo de íons negativos para cima. Apenas 5 minutos seria o intervalo de tempo necessário para neutralizar toda a carga superficial do planeta, que é cerca de $3,0 \times 10^5$ C, caso essa não fosse recomposta de alguma forma. A carga, no entanto, permanece constante, levando a crer que exista um mecanismo de bombeamento de cargas positivas para cima e de cargas negativas para baixo, em um sentido oposto ao das forças eletrostáticas exercidas pelo campo elétrico. A natureza desse mecanismo não é bem conhecida, mas acredita-se que o processo deva sofrer forte influência das constantes tempestades que se espalham pelo planeta. De algum modo, formam-se íons positivos e negativos durante uma tempestade, sendo os íons positivos conduzidos para cima e os negativos, para baixo, por meio de correntes de ar. Essas correntes são impulsionadas pelas diferenças de temperatura e pressão, de modo que, no final das contas, é a energia radiante do Sol que promove todo esse movimento.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. *Física*. Tradução de José Accioli. Rio de Janeiro: LTC, 1981. p. 514. (Adaptação).

Embora o campo elétrico terrestre enfraqueça com a altitude, uma primeira aproximação seria considerá-lo constante. Sabendo que a distribuição de cargas da ionosfera está a 50 km da superfície da Terra, uma usina de eletricidade que se valesse da diferença de potencial elétrico entre a superfície e a ionosfera poderia gerar uma potência de

A) 50 MW.
B) 500 MW.
C) 1 000 MW.
D) 5 000 MW.
E) 10 000 MW.

GABARITO

Fixação

01. E
02. D
03. A
04. D
05. A) $\Delta V_{AB} = 10$ V, $\Delta V_{BC} = 0$ e $\Delta V_{AC} = 10$ V
    B) $F_E = 1,0 \times 10^{-4}$ N e $W = -1,0 \times 10^{-5}$ J

Propostos

01. A
02. B
03. A
04. V F F F F
05. Soma = 17
06. Soma = 54
07. E
08. E
09. E
10. C
11. A
12. C
13. B
14. A) $-2,0 \times 10^{-6}$ J
    B) 0
15. $V_A = 90$ volts

Seção Enem

01. D 02. D

FÍSICA

Condutores

MÓDULO 05 FRENTE D

Estudamos o campo e o potencial elétrico criados em volta de uma carga elétrica (a fonte). Vimos que o campo está relacionado com a força elétrica, enquanto o potencial está relacionado com a energia que essa carga transmite para uma carga situada à sua volta (a carga de prova). Nos módulos anteriores, discorremos um pouco sobre os condutores de eletricidade. Aqui, os conceitos e as expressões matemáticas de campo e potencial elétrico que aprendemos serão úteis para estudarmos os condutores mais detalhadamente. Mesmo quando neutro, um condutor dispõe de cargas elétricas livres (ou pouco ligadas à rede metálica) capazes de fluir facilmente através do seu interior, quando um campo elétrico estiver agindo sobre elas.

Iniciaremos o estudo sobre os condutores discutindo a condição de equilíbrio eletrostático de um condutor. A seguir, veremos que, para essa condição, o campo elétrico no interior de qualquer condutor eletrizado vale zero. Isso nos levará à discussão de um fenômeno elétrico muito importante, conhecido como blindagem eletrostática. Na segunda parte deste módulo, estudaremos o potencial elétrico de condutores em equilíbrio eletrostático. Ao longo do texto, expressões para calcular o campo e o potencial elétrico criados por condutores esféricos serão apresentadas. Essas expressões nos ajudarão a quantificar o fenômeno da ruptura da rigidez dielétrica nas proximidades desses condutores.

O EQUILÍBRIO ELETROSTÁTICO

Considere que uma esfera condutora tenha sido eletrizada negativamente pelo atrito com um tecido. A figura 1 mostra essa esfera. A carga negativa que ela adquiriu não flui através do bastão e do corpo da pessoa, porque o bastão é feito de um material isolante. Durante essa eletrização, os elétrons transferidos do tecido para a esfera sofrem repulsão elétrica entre si, e ocorre uma movimentação de elétrons na superfície do condutor. Nesse local, os elétrons em excesso ficam o mais distante possível uns dos outros. Como você sabe, esse deslocamento interno de cargas é possível porque a esfera é condutora. Se ela fosse feita de um material isolante, como o vidro, a carga negativa ficaria concentrada na região friccionada.

Figura 1: A carga elétrica de um condutor se distribui sobre a sua superfície externa.

Durante o processo de eletrização da esfera, o movimento de elétrons em sua superfície ocorre muito rapidamente. Quase que imediatamente após a interrupção do atrito do tecido contra a esfera, os elétrons em excesso já ficam posicionados, uniformemente distribuídos na superfície da esfera, de modo que não há movimento ordenado de cargas. Nesse estado, dizemos que o condutor está em equilíbrio eletrostático.

Se a esfera da figura 1 tivesse sido atritada contra outro material, de modo que a região friccionada ficasse com uma carga positiva, a redistribuição dessa carga pela superfície da esfera aconteceria da mesma forma. Nesse caso, a carga positiva presente no local da fricção atrairia elétrons das outras partes da esfera. O equilíbrio eletrostático seria atingido rapidamente, de forma bastante semelhante ao caso anterior.

No caso de condutores não esféricos, a carga elétrica também se distribui em sua superfície externa, porém, não uniformemente. Nas partes com menor raio de curvatura, como as pontas, observamos uma maior concentração de carga elétrica. Por isso, o campo elétrico no meio que envolve o condutor é mais intenso nas vizinhanças de pontas. A figura 2 mostra um condutor anesférico eletrizado positivamente. As linhas mostradas na figura são as linhas de força do campo elétrico do condutor. Observe a maior densidade de cargas na ponta esquerda do condutor e a maior intensidade do campo elétrico (maior concentração de linhas) presente no ar próximo desse local.

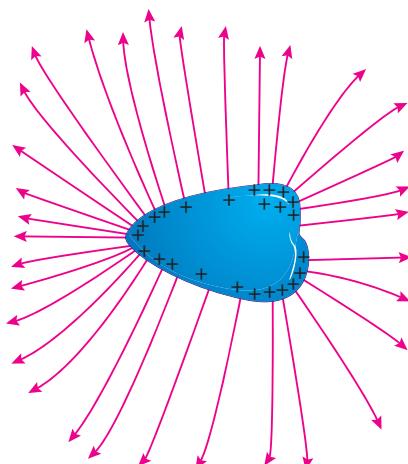



Figura 2: Distribuição não uniforme da carga elétrica sobre a superfície de um condutor anesférico.

O comportamento dos condutores de concentrar cargas nas pontas é conhecido como o **poder das pontas**. O princípio de funcionamento de um para-raios baseia-se no poder das pontas. Um para-raios é uma haste metálica aterrada na base e com pontas na extremidade superior. Quando uma nuvem eletrizada passa perto do local onde o para-raios foi instalado, o campo elétrico entre a nuvem e a terra torna-se mais intenso em torno das pontas do para-raios. Por isso, a probabilidade de a rigidez dielétrica do ar ser rompida perto dessas pontas e de a descarga elétrica ocorrer entre a nuvem e o para-raios é maior do que em outros locais.

A seguir, vamos aprender a calcular o campo e o potencial elétrico em um condutor em equilíbrio eletrostático. Antes, destacamos o seguinte resumo desta seção:

> Um condutor está em equilíbrio eletrostático quando nele não ocorre mais o movimento ordenado de suas cargas livres. Nessa condição, a repulsão elétrica leva a uma distribuição de cargas na superfície externa do condutor, com uma maior concentração de cargas nas regiões de menor raio de curvatura, como as pontas.

O CAMPO ELÉTRICO DE UM CONDUTOR EM EQUILÍBRIO ELETROSTÁTICO

Nesta seção, vamos analisar o campo elétrico gerado por um condutor eletrizado. Primeiro, vamos analisar o campo elétrico no interior do condutor. Estando em equilíbrio eletrostático, as cargas livres do condutor não se deslocam ordenadamente em uma direção. Por isso, concluímos que o campo elétrico, no interior do condutor, é nulo. Se houvesse campo elétrico interno, as cargas livres sofreriam a ação de forças elétricas e se movimentariam ordenadamente numa certa direção.

Para a condição de equilíbrio eletrostático, o campo elétrico na superfície externa do condutor existe, mas a sua direção é perpendicular à superfície. Isso pode ser observado ao longo de toda a superfície do condutor mostrado na figura 2. Como as cargas da superfície não se movimentam ordenadamente, o campo elétrico não pode apresentar uma componente tangencial. Se esta existisse, ela causaria o aparecimento de uma força elétrica tangencial sobre as cargas, que se moveriam sobre a superfície do condutor, contrariando a situação de equilíbrio eletrostático.

A figura 3 mostra a tendência de movimento de um elétron livre na superfície externa de um condutor, que acaba de ser eletrizado, durante o rearranjo de suas cargas. Nesse caso, a direção do campo elétrico é inclinada em relação à superfície. A componente tangencial do campo existe apenas durante o curto intervalo de tempo que precede o equilíbrio eletrostático. Observe que o lado esquerdo do condutor possui uma carga positiva maior que o lado direito. Como as curvaturas dos dois lados são parecidas, existe um desequilíbrio. Por isso, os elétrons se movimentam para a esquerda.

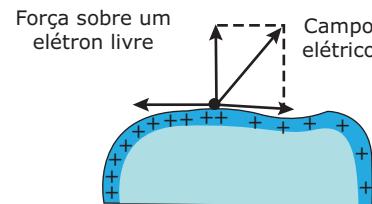



Figura 3: Movimento de cargas na superfície de um condutor que não se acha em equilíbrio eletrostático.

É óbvio que, em volta de um condutor eletrizado, mesmo para a condição de equilíbrio eletrostático, existe campo elétrico, pois qualquer carga de prova ali colocada experimentará a ação de uma força elétrica exercida pelo condutor. Isso pode ser constatado por meio de experiências simples, como ilustra a figura 4. As setas em vermelho indicam os sentidos do campo elétrico da esfera maior. Como a carga desta é positiva, o campo elétrico criado por ela diverge a partir da sua superfície. As duas pequenas esferas, também eletrizadas positivamente, sofrem forças no mesmo sentido do campo elétrico.

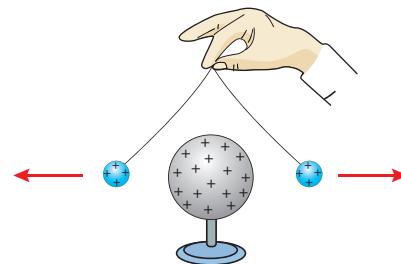



Figura 4: Experiência para confirmar que existe campo elétrico em volta de um condutor eletrizado.

CAMPO ELÉTRICO DE UMA ESFERA ELETRIZADA

Agora, vamos aprender a calcular o campo elétrico no exterior de uma esfera condutora. Já vimos que o campo interno em qualquer condutor em equilíbrio eletrostático vale zero. No caso de uma esfera, pouco importa se ela é maciça, oca ou se é simplesmente uma casca esférica; o campo interno vale zero. Para todas essas geometrias, a carga acha-se uniformemente distribuída na superfície.

O campo externo de uma esfera condutora, com carga superficial Q, apresenta uma simetria idêntica àquela do campo de uma carga pontual Q, localizada no centro da esfera. Por isso, o campo externo de uma esfera eletrizada pode ser calculado como se toda a sua carga estivesse concentrada em seu centro. Matematicamente, temos:

$$E = \frac{KQ}{r^2}$$

Nessa expressão, Q é a carga da esfera, K é a constante eletrostática do meio dielétrico onde a esfera se acha, e r é a distância do centro da esfera até o ponto onde desejamos calcular o campo elétrico. Em hipótese alguma essa expressão pode ser usada para $r < R$ (sendo R o raio da esfera), pois o ponto, nesse caso, encontra-se dentro da esfera, local em que o campo é nulo.

A figura 5 mostra o gráfico do campo elétrico criado por uma esfera condutora em função da distância ao seu centro. Observe que o campo interno é zero, e que o campo externo obedece à lei do inverso do quadrado da distância, típica para uma carga pontual.

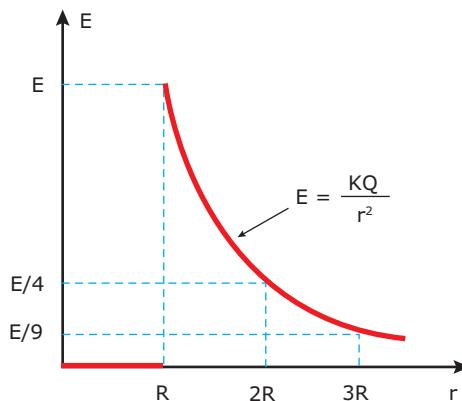



Figura 5: Campo elétrico de uma esfera condutora, em função da distância ao centro.

No estudo sobre campo elétrico, aprendemos que a rigidez dielétrica corresponde ao maior valor do campo elétrico que pode ser aplicado a um isolante, sem que ele se torne condutor. Para o ar, esse valor é $3,0 \times 10^6$ N/C. Assim, usando a expressão para o cálculo do campo elétrico de uma esfera condutora, podemos determinar a carga máxima que a esfera pode receber sem que o ar próximo à sua superfície tenha sua rigidez dielétrica rompida. Essa carga, naturalmente, depende do raio da esfera, mas não do seu material. Para uma esfera de raio R = 10 cm, imersa no ar, a carga máxima vale:

$$\text{Rigidez dielétrica} = \frac{KQ_{máx}}{R^2}$$

$$3,0 \times 10^6 = \frac{9,0 \times 10^9 Q_{máx}}{0,10^2}$$

$$Q_{máx} = 3,3\ \mu C$$

A BLINDAGEM ELETROSTÁTICA

Vimos que o campo elétrico no interior de qualquer condutor eletrizado, em equilíbrio eletrostático, é nulo. Agora, vamos examinar o caso em que o condutor está neutro, mas próximo de uma carga elétrica externa. Veremos que o campo elétrico desta carga se manifesta em todos os pontos do espaço em sua volta, exceto naqueles que estão dentro do condutor. O interior de um condutor é um lugar onde o campo elétrico de um agente externo não consegue entrar. Esse efeito é conhecido como **blindagem eletrostática**.

A figura 6 ilustra a blindagem eletrostática. Na figura A, um bastão de vidro eletrizado positivamente atrai uma esfera eletrizada negativamente ou mesmo neutra. Neste último caso, uma carga negativa e outra positiva são induzidas no lado direito e esquerdo da esfera, respectivamente. O campo não uniforme do bastão atrai mais intensamente a carga negativa do que repele a positiva e, assim, a esfera é atraída pelo bastão.

Na figura B, a esfera foi coberta com uma gaiola metálica. O campo elétrico do bastão se manifesta em torno da gaiola, mas não dentro dela. O campo elétrico do bastão no interior da gaiola vale zero. Por isso, a esfera não é atraída. De fato, isso só seria estritamente verdadeiro se a gaiola fosse fechada por um fundo condutor. Todavia, mesmo com o fundo aberto, a blindagem da gaiola é quase total.

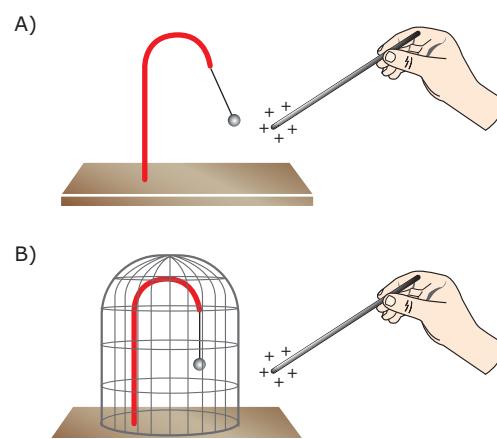



Figura 6: Experiência para constatar a blindagem eletrostática.

Benjamin Franklin e, depois, Michael Faraday foram os primeiros cientistas a estudarem a blindagem eletrostática. Em particular, Faraday realizou uma célebre experiência. Ele construiu uma grande caixa, revestida de metal e apoiada sobre isolantes, e a eletrizou com o auxílio de um potente gerador eletrostático, até que grandes faíscas saltaram de suas paredes externas. Nessas condições, Faraday entrou na caixa e realizou uma série de experimentos (ele usou velas acesas, eletroscópios, etc.), não encontrando o menor vestígio da influência do campo elétrico gerado pelas cargas das paredes externas da caixa. Por isso, atualmente, os invólucros metálicos usados para produzir blindagem eletrostática são popularmente conhecidos como **gaiolas de Faraday**.

Agora, vamos entender por que o campo elétrico de uma carga externa não penetra no interior de um condutor. Para isso, vamos considerar que a carga externa é uma placa eletrizada positivamente, de modo que o campo elétrico da placa seja uniforme. As linhas de força, paralelas entre si, saem da placa e vão para o infinito. Então, imagine que uma esfera condutora seja imersa nessas linhas, como mostra a figura 7. Note que uma carga negativa é induzida no lado esquerdo da esfera, enquanto uma carga positiva é induzida no outro lado. Como a esfera encontra-se em equilíbrio eletrostático (lembre-se de que a separação de cargas na esfera ocorre quase instantaneamente após a sua introdução no campo elétrico da placa), não há mais movimento ordenado de elétrons livres em seu interior. Concluímos, portanto, que o campo elétrico em seu interior vale zero. Observe que as linhas de força são perpendiculares à superfície da esfera. Assim, não há componente tangencial de campo, e a carga induzida permanece estacionária.

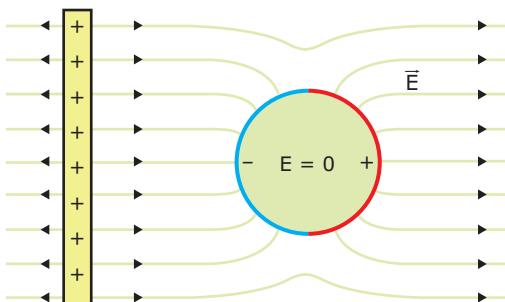
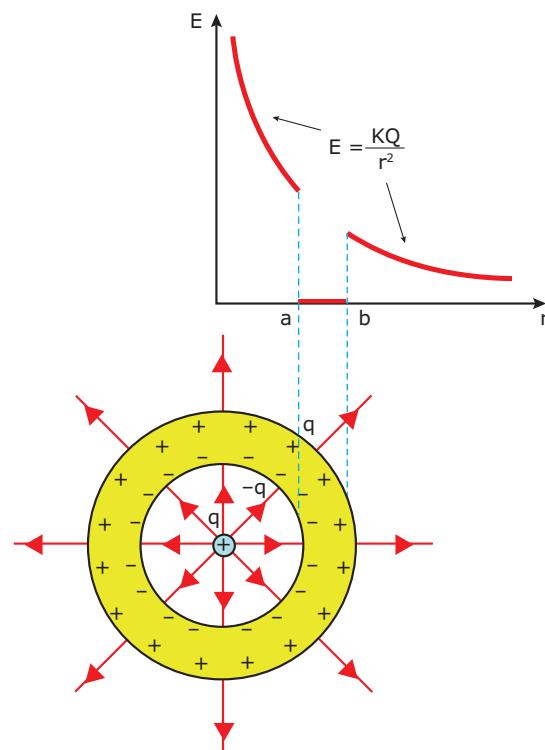



Figura 7: O campo elétrico da placa não penetra no interior da esfera condutora.

Podemos usar outro argumento para analisar o campo elétrico dentro dessa esfera. A carga da placa produz um campo elétrico uniforme, horizontal e dirigido para a direita na região da esfera. Por sua vez, a carga induzida na esfera cria um campo elétrico interno horizontal e dirigido para a esquerda. Os campos da placa e da esfera apresentam módulos iguais e se cancelam. Por isso, o campo resultante dentro da esfera vale zero.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Uma carga pontual +q acha-se no centro de uma casca esférica metálica neutra de raio interno a e raio externo b. Explicar por que existe uma carga induzida –q na superfície interna da esfera e uma carga +q na superfície externa. Determinar as expressões para calcular o campo elétrico desse sistema.

Resolução:

A força de atração da carga pontual +q sobre os elétrons livres da casca metálica causa a indução de uma carga negativa na parte interna da casca e de uma carga positiva na parte externa. Em geral, a carga induzida não é igual à carga indutora (normalmente, a primeira é menor). Nesse problema, essas cargas são iguais porque o número de linhas de força que sai da carga pontual +q é exatamente igual ao número de linhas que chega à carga induzida distribuída na parte interna da casca. Isso ocorre porque as linhas que partem da carga pontual não podem chegar a outro lugar que não seja a parte interna da casca (observe a figura). Por sua vez, como a carga induzida na parte interna vale –q, a carga induzida externamente vale +q.

Agora, vamos determinar o campo elétrico dessa distribuição de cargas. Como a esfera se encontra em equilíbrio eletrostático, os seus elétrons livres não se movimentam ordenadamente. Portanto, o campo na parte metálica é nulo (observe que as linhas de força são interrompidas nessa região). Na parte oca e na parte externa, existe campo elétrico. Por simetria, os campos elétricos das cargas +q e –q induzidas na casca são iguais em módulo e de sentidos opostos; logo, se cancelam. Por isso, o campo elétrico líquido do sistema é devido apenas ao efeito da carga pontual +q. Esse campo pode ser calculado por meio da lei do inverso do quadrado da distância:

$$E = \frac{KQ}{r^2}$$

Essa expressão deve ser usada para $0 < r < a$ (interior da casca) e para $b < r < \infty$ (exterior da casca). O gráfico do campo elétrico em função da distância à carga pontual +q está mostrado juntamente com a casca esférica.

O POTENCIAL ELÉTRICO DE UM CONDUTOR EM EQUILÍBRIO ELETROSTÁTICO

Nos itens anteriores, aprendemos que o campo elétrico dentro de um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático é nulo. Agora, vamos discutir o comportamento do potencial elétrico dentro de um condutor nessas condições. Para isso, observe a figura 8, em que uma pequena esfera de massa m e de carga elétrica q acha-se suspensa por um fio isolante no interior de uma caixa metálica eletrizada positivamente e isolada, mas em equilíbrio eletrostático. Como o fio é isolante, a carga da esfera não pode ser transferida para as paredes externas da caixa através dele.

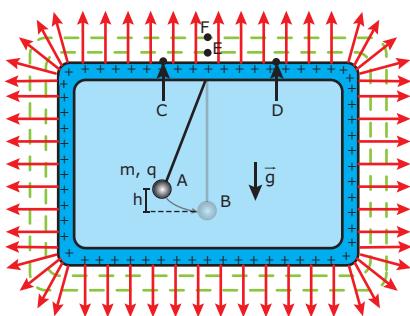



Figura 8: Experimento para estudar o potencial elétrico no interior de um condutor.

Observe que as linhas de força saem da superfície externa positiva do condutor e vão para o infinito. No interior do condutor (inclusive na parte maciça), não há campo elétrico. Por isso, não foram desenhadas linhas de forças nessa região.

Agora, imagine que a esfera seja abandonada do ponto A, que se acha a uma altura h em relação à posição mais baixa do pêndulo. A esfera desce acelerada exclusivamente pelo campo gravitacional g da Terra. Nesse deslocamento, o trabalho elétrico vale zero, pois o campo e a força elétrica valem zero. Assim, aplicando a definição de diferença de potencial elétrico, obtemos:

$$V_A - V_B = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{0}{q} = 0$$

Como $V_A - V_B = 0$, concluímos que os valores dos potenciais elétricos nos pontos A e B são iguais. Na verdade, todos os pontos dentro de um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático são submetidos a um mesmo potencial elétrico. No condutor da figura 8, entendemos por pontos internos não apenas aqueles que estão na parte oca da caixa, mas também os pontos situados na parte maciça.

Os pontos sobre a superfície de um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático também apresentam o mesmo potencial elétrico dos pontos internos. Primeiro, vamos explicar a igualdade dos potenciais dos pontos da superfície. Considere que uma carga se desloque do ponto C ao ponto D, mostrados na figura 8. Nesse caso, há uma força elétrica agindo na carga, mas ela não realiza trabalho porque a sua direção é perpendicular ao deslocamento (lembre-se de que o campo elétrico é perpendicular à superfície do condutor). Por isso, o potencial V_C é igual ao potencial V_D, assim como são iguais os potenciais de todos os outros pontos da superfície. A igualdade do potencial de um ponto sobre a superfície do condutor e de outro em seu interior (por exemplo, os pontos D e A) pode ser demonstrada da mesma forma, imaginando que a carga, agora, se desloque entre esses pontos. Como o trabalho elétrico é zero, os potenciais são iguais. Portanto, um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático é um volume equipotencial.

Fora de um condutor eletrizado, o valor do potencial elétrico depende da posição em que é feita a análise. Por exemplo, na figura 8, se uma carga positiva for abandonada no ponto E, ela sofrerá ação de uma força elétrica dirigida para cima e se moverá em direção ao ponto F. Sendo assim, o potencial do ponto F é menor que o do ponto E, pois o potencial diminui no sentido das linhas de força.

O potencial elétrico externo apresenta valores iguais em pontos situados sobre uma mesma superfície equipotencial. No estudo sobre potencial elétrico, vimos que essas superfícies são sempre perpendiculares às linhas de força do campo elétrico. Na figura 8, as duas linhas tracejadas em volta do condutor são cortes de superfícies equipotenciais. O potencial sobre a superfície mais externa é menor que o da superfície mais próxima ao condutor.

Entre os conceitos discutidos nesta seção, destacamos:

> O potencial elétrico no interior de um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático é constante. Externamente, o potencial diminuiu no sentido das linhas de força do campo elétrico, mantendo-se constante no plano perpendicular a elas.

POTENCIAL ELÉTRICO DE UMA ESFERA ELETRIZADA

De acordo com o que estudamos na seção anterior, qualquer condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático apresenta o mesmo potencial elétrico em toda a extensão de seu volume, inclusive na superfície externa. A partir dessa superfície, o potencial varia ao longo das linhas de força do campo elétrico externo. Em particular, no caso de uma esfera condutora eletrizada com uma carga Q, esse potencial pode ser calculado pela lei do inverso da distância, como se a carga Q estivesse concentrada no centro da esfera. Utilizamos o mesmo recurso para calcular o campo elétrico de uma esfera, e a mesma justificativa é válida nos dois casos: uma esfera com carga superficial uniformemente distribuída apresenta simetria espacial idêntica à de uma carga pontual. Portanto, o potencial elétrico de uma esfera condutora de raio R e de carga Q, em equilíbrio eletrostático (considerando o infinito como o nível de potencial elétrico igual a zero), é dado por:

$$V = \frac{KQ}{R} \text{ (para: } r \leq R) \quad \text{e} \quad V = \frac{KQ}{r} \text{ (para: } R \leq r \leq \infty)$$

Nessa expressão, K é a constante eletrostática do meio onde a esfera está imersa, e r é a distância do centro da esfera ao ponto onde o potencial elétrico é calculado. Observe que o denominador da primeira equação é sempre o raio R da esfera, mesmo se o potencial estiver sendo calculado em um ponto interno, onde $r < R$. Para o caso de um ponto externo, usamos a segunda equação.

A figura 9 mostra o gráfico do potencial elétrico produzido por uma esfera condutora eletrizada positivamente e em equilíbrio eletrostático em função da distância ao seu centro. Abaixo do gráfico, aparecem a esfera e duas superfícies equipotenciais.

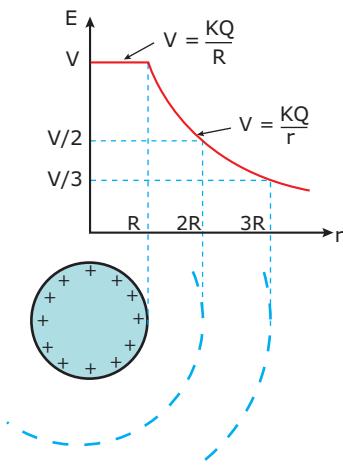
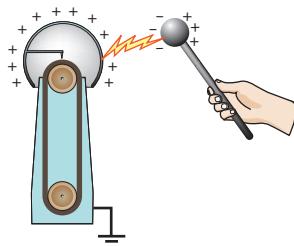



Figura 9: Potencial elétrico produzido por uma esfera condutora em função da distância ao centro.

Vamos finalizar esta seção, analisando o Exercício Resolvido 01 do ponto de vista do potencial elétrico. Na figura deste problema, observe que as linhas de campo elétrico são dirigidas da carga +q para a casca esférica. Por isso, o potencial central é maior que o da casca esférica. Na verdade, o potencial elétrico de uma carga +q é sempre maior do que o potencial elétrico de um condutor que o envolve (cavidade), independentemente do valor da carga +q. Por isso, se a carga interna for colocada em contato com a cavidade (por exemplo, através de um fio metálico), a carga interna será completamente transferida para a cavidade.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

02. A esfera de um gerador de Van de Graaf tem raio igual a 20 cm. A esfera é eletrizada com uma carga igual a +10 μC, e o gerador é desligado. A seguir, uma esfera de raio 5,0 cm é aproximada da esfera do gerador, e, a certa distância, ocorre uma descarga elétrica, como mostra a figura.

A) Mostrar que essa esfera condutora isolada no ar pode receber uma carga um pouco maior que 13 μC sem risco de ruptura da rigidez dielétrica do ar. Explicar por que houve a ruptura da rigidez do ar na situação descrita nesta questão, apesar de a carga da esfera do gerador ser de apenas 10 μC.

B) Determinar as cargas finais na esfera do gerador e na esfera menor, depois da descarga elétrica, considerando que as duas esferas se toquem.

Resolução:

A) A rigidez dielétrica do ar vale $3,0 \times 10^6$ N/C, que representa o maior valor do campo elétrico que pode ser aplicado ao ar sem que ele se torne condutor. A substituição desse valor na equação do campo elétrico próximo à superfície da esfera fornece a carga máxima que ela pode receber:

$$\text{Rigidez dielétrica} = \frac{KQ_{máx.}}{R^2}$$

$$3,0 \times 10^6 = \frac{9,0 \times 10^9 . Q_{máx.}}{0,20^2} \Rightarrow 13,3\ \mu C$$

Individualmente, a esfera do gerador não pode gerar um campo maior que $3,0 \times 10^6$ N/C no espaço entre ela e a esfera menor, pois a sua carga é de apenas 10 μC. Todavia, há indução de uma carga negativa e outra positiva na esfera menor, como mostra a figura. Por isso, essa esfera menor também produz um campo elétrico entre as esferas. Esse campo e o campo da esfera do gerador são dirigidos para a direita. Assim, os campos das duas esferas são somados. Para uma aproximação suficientemente pequena entre as esferas, o campo elétrico resultante gerado por elas supera a rigidez dielétrica do ar.

B) A carga da esfera maior se distribuiu entre ela e a esfera menor. A troca de cargas iniciou-se no momento da descarga, continuou durante o contato entre as esferas e terminou quando elas atingiram o equilíbrio eletrostático. Nesse instante, os potenciais elétricos nas duas esferas ficaram iguais, e o deslocamento de cargas entre elas cessou. De acordo com a equação para se calcular o potencial ($V = KQ/R$), e sabendo que V é constante no equilíbrio, concluímos que a carga de cada esfera é diretamente proporcional ao raio. De acordo com o Princípio da Conservação das Cargas, a soma das cargas finais das esferas deve ser +10 μC (carga inicial do sistema). Como o raio da esfera maior é 20 cm, ele é quatro vezes maior que o raio de 5,0 cm da esfera menor. Assim, concluímos que a carga final na esfera maior é +8,0 μC, e na esfera menor é +2,0 μC. Matematicamente, chegamos a esses valores resolvendo o seguinte sistema de equações:

$$Q + q = 10 \quad \text{e} \quad \frac{KQ}{20} = \frac{Kq}{5,0}$$

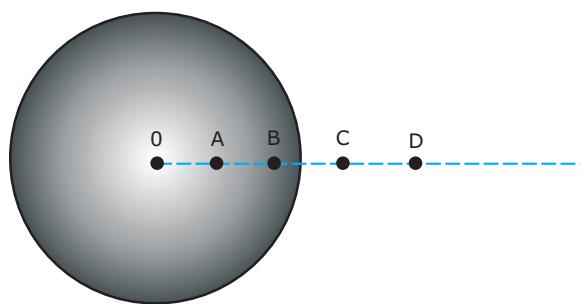
A carga final Q está associada à esfera de raio 20 cm, enquanto a carga q, à esfera de raio 5,0 cm. Observe que a constante de Coulomb K pode ser cancelada na segunda equação. Isso mostra que as cargas finais independem do meio em que as esferas se encontram.

Assim, obtemos:

$Q = +8,0\ \mu C$ e $Q = +2,0\ \mu C$

Esse exercício ilustrou a eletrização por contato. Nesse tipo de eletrização, as cargas finais sempre apresentam sinais iguais, e a esfera maior fica com a maior quantidade de carga.

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (Unifor-CE) Dadas as afirmativas:

1. Na superfície de um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico é normal à superfície.
2. Na superfície de um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático, o potencial é constante.
3. Na superfície de um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático, a densidade superficial de carga é maior em pontos de raio de curvatura menor.

Podemos afirmar que

A) somente a primeira está correta.

B) somente a segunda está correta.

C) somente a terceira está correta.

D) todas estão corretas.

E) nenhuma delas está correta.

Instrução: Texto para os exercícios **02** e **03**

A figura a seguir representa a seção reta de uma esfera condutora, de raio igual a 2,5 cm, carregada positivamente. A partir do centro 0 da esfera, acham-se situados os pontos A, B, C e D, tais que 0A = AB = BC = CD = 1,0 cm.

02. (PUC Minas) Escolha a alternativa que contenha valores coerentes, numa mesma unidade, para os campos elétricos nos pontos A, B, C e D, nessa ordem.

A) 4,0; 3,0; 2,0; 1,0

B) 16,0; 9,0; 4,0; 1,0

C) zero; zero; 3,0; 4,0

D) zero; zero; 16,0; 9,0

E) 4,0; 1,0; zero; zero

03. (PUC Minas) Escolha a alternativa que contenha valores coerentes para os potenciais elétricos, numa mesma unidade, nos pontos A, B, C e D, nessa ordem.

A) 4,0; 3,0; 2,0; 1,0

B) 4,8; 4,8; 4,0; 3,0

C) zero; zero; 4,0; 3,0

D) 4,8; 4,8; 4,8; 4,8

E) zero; zero; zero; zero

04. (UFMG) Um estudante coloca pequenos pedaços de papel sobre uma placa de isopor debaixo de uma peneira de plástico. Ele atrita um pente em seus cabelos, aproxima-o da peneira e repara que os papéis são atraídos pelo pente. Depois, troca a peneira de plástico por outra metálica e repete o experimento. Observa, então, que os papéis não são atraídos pelo pente. Essa diferença é devido

A) à eletricidade do pente ser anulada pelo magnetismo da peneira metálica.

B) à peneira de plástico e aos pedaços de papel serem isolantes elétricos.

C) à peneira de metal criar uma blindagem eletrostática.

D) à peneira de plástico ter propriedades magnéticas.

05. (UFPR–2007)

A) Sabe-se que a rigidez dielétrica do ar numa certa região vale $3,0 \times 10^6$ N/C. Qual é a carga máxima que pode ser armazenada por um condutor esférico com raio de 30 cm colocado nessa região?

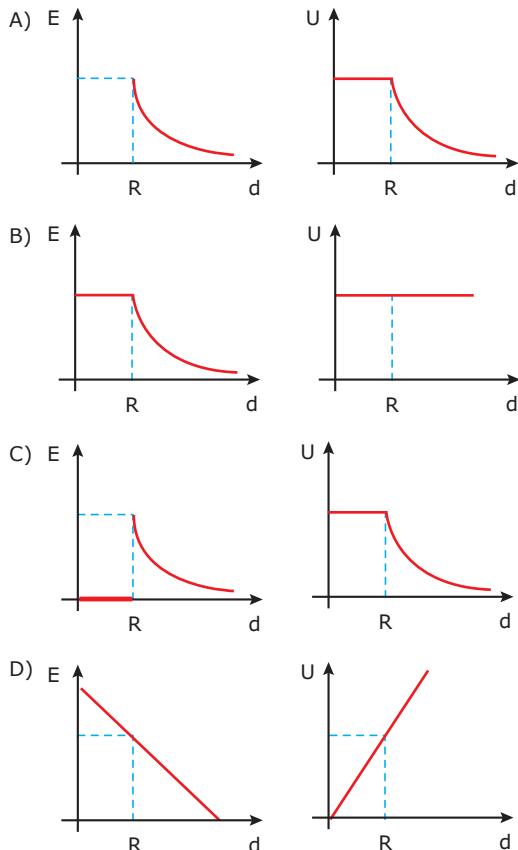
B) Supondo que o potencial elétrico a uma distância muito grande do condutor seja nulo, quanto vale o potencial elétrico produzido por esse condutor esférico na sua superfície quando ele tem a carga máxima determinada no item anterior?

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (FMJ-SP) Responda de acordo com o seguinte código:

I. A direção do vetor campo elétrico é normal à superfície, em cada ponto.

II. O trabalho para se mover uma carga elétrica ao longo da superfície é independente da intensidade do campo, supondo, mantido o equilíbrio eletrostático.

III. Ela não é equipotencial.

Em relação à superfície de um condutor eletrizado e em equilíbrio eletrostático, pode-se afirmar que

A) somente a afirmativa I é correta.

B) somente a afirmativa II é correta.

C) somente a afirmativa III é correta.

D) são corretas I e II.

E) são corretas II e III.

02. (UFLA-MG–2009) Considere um corpo eletrizado com carga Q no vácuo e um ponto P distante de d nas proximidades de Q. Das afirmações a seguir, a **CORRETA** é:

A) No ponto P, o campo elétrico gerado por Q pode ser positivo ou negativo, dependendo de sua carga.

B) Colocando-se em P uma carga de prova pontual q, a força elétrica que atua sobre ela pode ser positiva ou negativa, dependendo dos sinais de Q e q.

C) O potencial elétrico gerado por Q em P é inversamente proporcional ao quadrado da distância d.

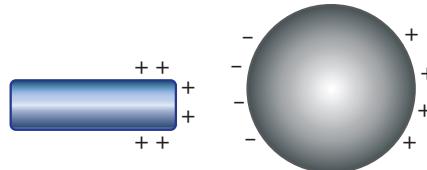
D) No ponto P, o potencial elétrico gerado por Q pode ser positivo ou negativo, dependendo de sua carga.

03. (UNIFEI-MG–2007) Uma esfera condutora oca de raio R, situada no vácuo, está eletrizada com uma carga positiva q. As intensidades do campo E e do potencial elétrico U em função da distância d, medida a partir do centro da esfera, são

A)

B)

C)

D)

04. (Unifor-CE) Uma esfera metálica, de raio 10 cm, isolada de outros corpos, está imersa no ar e eletrizada com carga $Q = 2,0 \times 10^{-8}$ C. A constante eletrostática do ar vale $9,0 \times 10^9$ Nm²/C². Os módulos do vetor campo elétrico e do potencial elétrico no centro da esfera, em unidades do Sistema Internacional, valem, respectivamente,

A) zero e zero.

B) zero e $1,8 \times 10^3$.

C) 1,8 e 18.

D) $1,8 \times 10^2$ e zero.

E) $1,8 \times 10^3$ e $1,8 \times 10^4$.

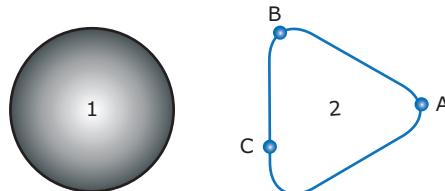
05. (Unifor-CE) Dois condutores metálicos e esféricos, 1 e 2, respectivamente, de raios R e 2R com cargas elétricas +16Q e –4Q, estão isolados um do outro e, também, da vizinhança. Os dois condutores foram ligados um ao outro por um fio condutor e, em seguida, foram desligados. Após serem desligados e ficarem isolados novamente, as cargas elétricas existentes nos condutores 1 e 2 serão, respectivamente,

A) –8Q e +8Q.

B) –6Q e +6Q.

C) +4Q e +8Q.

D) +6Q e +6Q.

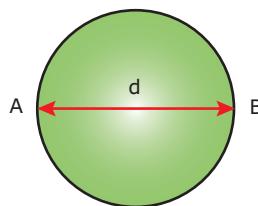
E) +8Q e +8Q.

06. (UFMG) Atrita-se um bastão com lã, de modo que ele adquire carga positiva. Aproxima-se então o bastão de uma esfera metálica com o objetivo de induzir nela uma separação de cargas. Essa situação é mostrada na figura.

Pode-se então afirmar que o campo elétrico no interior da esfera é

A) diferente de zero, horizontal, com sentido da direita para a esquerda.

B) diferente de zero, horizontal, com sentido da esquerda para a direita.

C) nulo apenas no centro.

D) nulo em todos os lugares.

07. (CESCEM-SP) Um condutor (2) com a forma indicada na figura, inicialmente neutro, é aproximado de um condutor esférico (1) carregado positivamente, como indica a figura.

Se V_A, V_B e V_C forem os potenciais eletrostáticos nos pontos A, B e C, respectivamente, é **VERDADE** que, após o equilíbrio eletrostático,

A) $V_C > V_B > V_A$.

B) $V_C = V_B = V_A$.

C) $V_C < V_B < V_A$.

D) $V_A = 0$.

08. (PUC RS) A figura representa uma esfera condutora eletrizada com carga elétrica total Q em equilíbrio eletrostático. Dois pontos, A e B, estão posicionados sobre a superfície da esfera. A distância entre eles é igual a d.

Uma carga de teste ou de prova q é deslocada de A até B. O trabalho realizado sobre a mesma é igual a

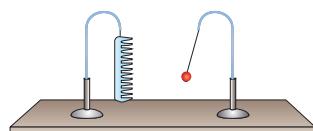
A) zero.
B) Qd.
C) Qqd.
D) KQq/d².
E) Qq/d².

09. (EFEI-MG) Uma pequena esfera metálica maciça é carregada ao potencial positivo de 1 volt e introduzida em uma grande esfera metálica oca carregada ao potencial de 104 volts. Se a esfera pequena é posta em contato com a superfície interna da esfera oca,

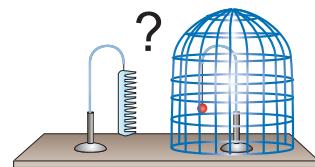
A) uma parte da carga da esfera oca se transfere para a esfera maciça, cujo potencial cai a zero.
B) uma parte da carga da esfera oca se transfere para a esfera maciça, cujo potencial se eleva para 104 volts.
C) uma parte da carga da esfera maciça se transfere para a esfera oca, e o potencial da esfera maciça cai a zero.
D) toda a carga da esfera maciça se transfere para a esfera oca, e o potencial da esfera maciça fica igual a 104 volts.
E) Nenhuma das respostas anteriores.

10. (UFMG–2010)

1. Para testar as novidades que lhe foram ensinadas em uma aula de Ciências, Rafael faz algumas experiências, a seguir descritas.

   Inicialmente, ele esfrega um pente de plástico em um pedaço de flanela e pendura-o em um fio isolante. Observa, então, que uma bolinha de isopor pendurada próxima ao pente é atraída por ele, como mostrado na figura I, a seguir.

   Figura I

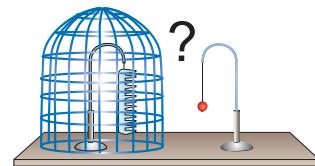
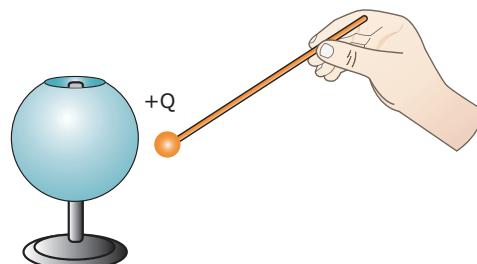
   EXPLIQUE por que, nesse caso, a bolinha de isopor é atraída pelo pente.

2. Em seguida, enquanto o pente ainda está eletricamente carregado, Rafael envolve a bolinha de isopor com uma gaiola metálica, como mostrado na figura II, a seguir, e observa o que acontece.

   Figura II

   RESPONDA:

   A bolinha de isopor continua sendo atraída pelo pente?

   JUSTIFIQUE sua resposta.

3. Para concluir, Rafael envolve o pente, que continua eletricamente carregado, com a gaiola metálica, como mostrado na Figura III, a seguir, e, novamente, observa o que acontece.

   Figura III

   RESPONDA:

   Nessa situação, a bolinha de isopor é atraída pelo pente?

   JUSTIFIQUE sua resposta.

11. (EEM-SP) Uma esfera condutora de raio R_1 = 5,0 cm está eletrizada com uma carga Q = 2,0 x 10^{-9} C. Qual o potencial dessa esfera? Qual o seu novo potencial após ter sido colocada em contato e depois separada de uma segunda esfera, de raio R_2 = 10 cm, inicialmente neutra? Dado: $1/(4\pi\varepsilon_0)$ = 9,0 x 10^9 unidades SI

12. (ITA-SP) Na figura a seguir, temos uma esfera oca de alumínio e na ponta do bastão, uma pequena esfera também de alumínio. A esfera oca está neutra, e a do bastão está eletrizado com carga (Q), positiva.

Você pretende eletrizar a esfera oca usando a carga do bastão (Q). Haverá diferença entre fazer o contato da esferinha externamente ou internamente com a esfera oca?

SEÇÃO ENEM

01. (Enem–2010) Duas irmãs que dividem o mesmo quarto de estudos combinaram de comprar duas caixas com tampas para guardarem seus pertences dentro de suas caixas, evitando, assim, a bagunça sobre a mesa de estudos. Uma delas comprou uma metálica, e a outra, uma caixa de madeira de área e espessura lateral diferentes, para facilitar a identificação. Um dia as meninas foram estudar para a prova de Física e, ao se acomodarem na mesa de estudos, guardaram seus celulares ligados dentro de suas caixas. Ao longo desse dia, uma delas recebeu ligações telefônicas, enquanto os amigos da outra tentavam ligar e recebiam a mensagem de que o celular estava fora da área de cobertura ou desligado.

Para explicar essa situação, um físico deveria afirmar que o material da caixa, cujo telefone celular não recebeu as ligações é de

A) madeira, e o telefone não funcionava porque a madeira não é um bom condutor de eletricidade.
B) metal, e o telefone não funcionava devido à blindagem eletrostática que o metal proporcionava.
C) metal, e o telefone não funcionava porque o metal refletia todo tipo de radiação que nele incidia.
D) metal, e o telefone não funcionava porque a área lateral da caixa de metal era maior.
E) madeira, e o telefone não funcionava porque a espessura desta caixa era maior que a espessura da caixa de metal.

02. Um para-raios padrão é constituído de uma haste metálica ligada ao solo por meio de um cabo condutor. A haste é colocada em pontos elevados, como o topo de prédios e torres de igrejas. Devido ao poder das pontas, o campo elétrico entre uma nuvem eletrizada e a haste de um para-raios é mais intenso do que nas regiões vizinhas. Assim, a rigidez dielétrica do ar é rompida nesse espaço, de forma que uma descarga elétrica é direcionada para o para-raios, sem causar danos.

Durante uma tempestade, para se proteger da ação de raios, as pessoas

A) em carros e ônibus devem abandonar o veículo, abrigando-se debaixo de árvores.
B) em locais elevados como picos e montanhas, devem permanecer imóveis e em pé.
C) nas casas devem ficar longe das janelas e, no exterior, devem procurar pontos elevados.
D) nas casas não devem usar telefones e, no exterior, devem evitar lugares descampados.
E) nas casas podem telefonar normalmente e, na rua, devem evitar o uso desses aparelhos.

03. Uma experiência simples e clássica de Eletrostática pode ser realizada com material corriqueiro: papel, uma pequena peneira de metal usada na cozinha, um pente de plástico e um pedaço de lã. A experiência consiste em picar e espalhar pedacinhos do papel sobre uma mesa e observar a atração elétrica que há entre os papéis e o pente, sendo que este deve estar previamente eletrizado por atrito com a lã. Quando os papéis são cobertos com a peneira metálica, nota-se que a atração exercida pelo pente sobre os papéis cessa. Ao invés de usar uma peneira de metal, se os papéis fossem cobertos com uma peneira de plástico, a atração sobre os papéis

A) não seria observada, pois o plástico, ao contrário do metal, é um ótimo isolante elétrico.
B) não seria observada, pois a peneira de plástico criaria uma blindagem eletrostática em seu interior.
C) ocorreria normalmente, pois a peneira de plástico, diferentemente da metálica, não criaria blindagem eletrostática.
D) ocorreria normalmente, pois a peneira de plástico, diferentemente da metálica, não iria adquirir carga elétrica.
E) aumentaria um pouco, uma vez que a peneira de plástico se eletrizaria, reforçando a atração elétrica do pente.

GABARITO

Fixação

01. D
02. D
03. B
04. C
05. A) $3,0 \times 10^{-5}$ C
    B) $9,0 \times 10^{5}$ V

Propostos

01. D
02. D
03. C
04. B
05. C
06. D
07. B
08. A
09. D
10. 1. Ao atritar o pente de plástico na flanela, ele é eletrizado por atrito e estabelece ao seu redor um campo elétrico não uniforme. A bolinha de isopor, suposta inicialmente neutra, sofre um processo de polarização e, estando em um campo não uniforme, sofre ação de uma força resultante atrativa.
    2. Não, pois, estando a bolinha envolvida por uma gaiola metálica, não haverá campo elétrico atuando sobre ela devido à blindagem eletrostática provida pela gaiola metálica. Logo, a bolinha não será polarizada e, portanto, não será atraída.
    3. Sim, pois o pente no interior da gaiola metálica provoca a indução desta, que, por sua vez, gera um campo elétrico não uniforme em sua região externa. Esse campo elétrico provoca a polarização da bolinha de isopor e, sendo o campo não uniforme, exerce uma força resultante atrativa sobre a bolinha.
11. $3,6 \times 10^{2}$ V e $1,2 \times 10^{2}$ V
12. Sim. Se o contato for externo, a carga +Q será distribuída entre as duas esferas, de forma que a esfera maior receberá maior parcela da carga. Se o contato for interno, a carga +Q será completamente transferida para a esfera maior.

Seção Enem

01. B
02. D
03. C

FÍSICA

Corrente elétrica

MÓDULO 06 FRENTE D

O campo elétrico e a diferença de potencial elétrico são propriedades que se manifestam no espaço, capazes de comandar o movimento de uma carga elétrica numa certa direção. O movimento ordenado dessa carga constitui uma corrente elétrica. Em geral, estamos mais acostumados com a corrente elétrica fluindo através de um fio condutor ligado a uma bateria ou a uma tomada de força. Porém, a corrente elétrica é qualquer fluxo ordenado de cargas. O fluxo de íons em uma lâmpada fluorescente e o fluxo de prótons em um acelerador de partículas são exemplos de correntes elétricas. A figura 1 mostra um tipo particular de corrente elétrica, o fluxo de íons em uma descarga elétrica entre uma nuvem e a Terra.

Figura 1: Uma diferença de potencial de milhões de volts causou essa corrente elétrica.

Neste módulo, vamos analisar o conceito físico de corrente elétrica, relacioná-la ao fluxo de cargas e definir a sua direção. Além da diferença de potencial elétrico, veremos que a corrente depende também do grau de oposição que o movimento das cargas recebe ao longo do caminho. Essa oposição, chamada de resistência elétrica, depende da geometria e do material do condutor em que flui a corrente. Aprenderemos a calcular a resistência elétrica a partir desses parâmetros e também a relacioná-la com os valores da diferença de potencial elétrico e da corrente. Na sequência, estudaremos a Lei de Ohm. Esse importante princípio será a base para resolvermos muitos problemas sobre circuitos elétricos. Por fim, abordaremos os aspectos energéticos relacionados à corrente elétrica. Discutiremos a transformação da energia elétrica em outras formas de energia e deduziremos expressões matemáticas para calcular o consumo de energia em aparelhos elétricos, como lâmpadas, rádios e chuveiros.

CONCEITO FÍSICO DE CORRENTE ELÉTRICA

Considere um circuito elétrico simples, constituído por uma pilha seca, uma lâmpada de baixa potência e fios de ligação, como mostra a figura 2. Os polos de uma pilha ou de uma bateria mantêm-se eletrizados, um positivamente e outro negativamente, devido à ocorrência de reações químicas de redução e de oxidação no interior desse dispositivo.

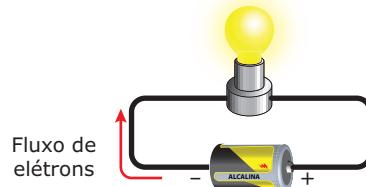



Figura 2: Sentido do fluxo de elétrons através de um fio condutor ligado aos polos de uma pilha simples.

Como existe uma diferença de potencial entre os polos dessa pilha e, consequentemente, entre as extremidades dos fios ligados a ela, um campo elétrico é estabelecido dentro dos fios. As linhas de força desse campo (não desenhadas na figura) se estendem por toda a extensão dos fios e são dirigidas do polo positivo para o polo negativo. A existência desse campo não contradiz as condições de campo elétrico nulo e de potencial elétrico constante no interior de um condutor isolado. No presente caso, os fios condutores não estão isolados, mas sim ligados a uma pilha que impõe uma diferença de potencial entre as suas extremidades.

O campo elétrico dentro do fio exerce forças elétricas sobre os elétrons livres no sentido oposto às linhas de força. Por isso, na figura 2, existe um fluxo de elétrons percorrendo o circuito externo (fios e lâmpada) no sentido do polo negativo para o polo positivo. Esse fluxo constitui uma corrente elétrica, sustentada pela diferença de potencial que existe entre os polos da pilha.

No interior da pilha, íons negativos (ânions) de uma mistura eletrolítica movem-se do polo positivo para o polo negativo da pilha, enquanto íons positivos (cátions) movem-se no sentido inverso. Esses movimentos não ocorrem de modo natural, como acontece com o movimento dos elétrons livres no circuito externo. A energia química da pilha é usada para movimentar esses íons no interior desta.

Uma corrente elétrica precisa de uma diferença de potencial para ser sustentada. Pilhas, baterias e tomadas de energia são fontes capazes de manter uma corrente circulando por fios ligados entre os seus terminais. A descarga elétrica mostrada na figura 1 não é uma corrente sustentada. No início, há uma diferença de potencial elétrico, entre a nuvem e a Terra, capaz de vencer a rigidez dielétrica do ar. Pouco tempo depois do início da descarga, os potenciais da nuvem e da Terra possuem valores próximos, a intensidade do campo elétrico diminui, e o ar volta a se comportar como um isolante elétrico.

Quanto maior for a diferença de potencial elétrico de uma fonte, maior será a corrente elétrica que passará por um fio condutor a ela conectado. Todavia, uma diferença de potencial elevada não deve ser confundida com um potencial elétrico elevado. De fato, um potencial isolado não pode gerar uma corrente elétrica. O passarinho, na figura 3, não corre risco de ser eletrocutado, apesar de estar pousado em um fio de +1 000 V. Um choque elétrico requer uma diferença de potencial elétrico entre uma parte e outra do corpo. Na figura 3, não existe essa diferença de potencial entre os pés do passarinho.

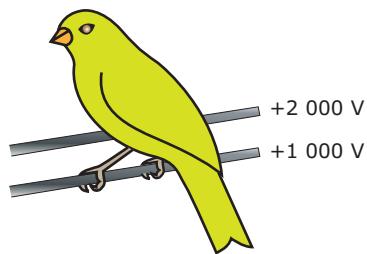



Figura 3: O passarinho pode pousar sem risco sobre um dos fios elétricos, mas não pode tocar simultaneamente os dois.

RAPIDEZ DA CORRENTE ELÉTRICA

Na ausência de campo elétrico interno, o movimento dos elétrons livres em um fio condutor é semelhante ao movimento das moléculas de um gás em um recipiente. Os elétrons livres movem-se ao acaso, com velocidades elevadas. Todavia, essas partículas sofrem colisões contra os íons fixos do condutor, e a velocidade efetiva das partículas é nula. Quando um campo elétrico é aplicado ao condutor, os elétrons livres sofrem a ação de uma força em sentido oposto ao desse campo. Embora as colisões contra a rede atômica continuem ocorrendo, os elétrons adquirem uma pequena velocidade de migração no sentido oposto ao do campo.

Por causa das colisões contra os íons fixos, o campo elétrico interno não imprime, em média, nenhuma aceleração aos elétrons livres de um condutor. O movimento efetivo dos elétrons ocorre de forma lenta, parecido com a descida de uma bolinha de gude em uma tábua inclinada, cravada com pregos. Da mesma forma que o campo gravitacional não acelera a bolinha de gude, o campo elétrico também não acelera os elétrons livres de um condutor. A energia potencial gravitacional é usada para aquecer a tábua, os pregos e a bolinha de gude. No fio, a energia elétrica é usada para aquecer a massa do condutor.

Se a velocidade de migração dos elétrons em um condutor é baixa, então por que uma lâmpada começa a brilhar assim que o interruptor de luz é ligado? Para a lâmpada brilhar, não é preciso esperar que os elétrons livres situados antes do interruptor comecem a se mover e, depois de algum tempo, cheguem até a lâmpada. Quando o interruptor é ligado, um campo elétrico é estabelecido no interior dos fios quase que instantaneamente. As linhas de força do campo elétrico aparecem ao longo de toda a extensão dos fios, não importando se esses são curtos ou longos. Os elétrons próximos à lâmpada, e até os próprios elétrons do filamento, respondem imediatamente à ação do campo elétrico assim que o interruptor é acionado, e, por esse motivo, a lâmpada começa a brilhar assim que o interruptor de luz é ligado.

SENTIDO DA CORRENTE ELÉTRICA

A figura 4 mostra outro exemplo de corrente elétrica. Uma lâmpada fluorescente tem os seus terminais ligados a uma diferença de potencial elétrico. O campo elétrico no interior da lâmpada é voltado para a esquerda. O gás ionizado no interior da lâmpada é constituído por íons de carga +q e −q. Os íons positivos se deslocam em direção ao eletrodo esquerdo da lâmpada, que apresenta um potencial elétrico menor que o do eletrodo direito. Naturalmente, os íons negativos se movem no sentido oposto.

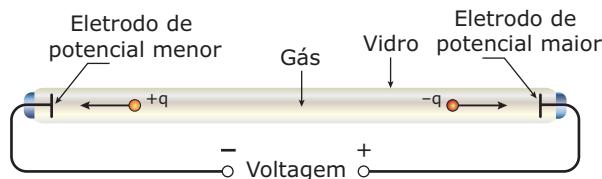



Figura 4: Corrente em uma lâmpada fluorescente.

A corrente na lâmpada é causada pelo movimento de íons positivos e negativos. Como o sentido do movimento dos íons positivos é oposto ao dos íons negativos, a seguinte pergunta aparece: qual é o sentido da corrente elétrica? Observações experimentais de fenômenos elétricos e eletromagnéticos revelam que o movimento de uma carga elétrica em um sentido é, com raras exceções, equivalente ao movimento de uma carga de sinal oposto e de mesmo módulo se movimentando em sentido contrário. Isso significa que, na figura 4, os íons de carga −q, movendo-se para a direita, podem ser substituídos por íons de carga +q, movendo-se para a esquerda. Nesse caso, o sentido da corrente elétrica é da direita para a esquerda.

Os físicos convencionaram que o sentido da corrente elétrica é o mesmo sentido do fluxo de cargas positivas, não importando se os portadores de cargas são realmente cargas positivas, negativas ou ambas. Em um acelerador de partículas, que produz um feixe de prótons, o sentido da corrente elétrica é o mesmo sentido do movimento dos prótons. Em um condutor metálico, como os fios da figura 2, o sentido da corrente elétrica é oposto ao sentido do movimento dos elétrons. Em uma solução iônica, o sentido da corrente é o mesmo sentido do movimento dos cátions e oposto ao sentido do movimento dos ânions. Como a corrente elétrica convencional é definida pelo movimento de cargas positivas, o sentido dessa corrente é o mesmo sentido do campo elétrico que a produz.

A seguir, vamos quantificar a corrente elétrica. Antes, destacamos os seguintes fundamentos vistos até aqui:

> A corrente elétrica é um fluxo de cargas gerado por um campo elétrico. Tanto o fluxo de cargas negativas em um sentido quanto o fluxo de cargas positivas no sentido oposto contribuem para uma corrente elétrica no mesmo sentido. Convencionalmente, o sentido da corrente é aquele do fluxo de cargas positivas. Esse sentido é o mesmo do campo elétrico gerador da corrente elétrica.

DEFINIÇÃO MATEMÁTICA DA CORRENTE ELÉTRICA

A figura 5 mostra a seção transversal de um condutor metálico percorrido por uma corrente elétrica de intensidade I. As pequenas esferas representam elétrons livres. Observe que o sentido da corrente é oposto ao movimento de migração dos elétrons. A intensidade da corrente elétrica é definida como a taxa do fluxo de carga através de uma área perpendicular à trajetória do movimento dessas cargas. Assim, quanto maior for o número de elétrons que atravessam a seção transversal de um condutor num dado tempo, maior será a intensidade da corrente elétrica nesse condutor.

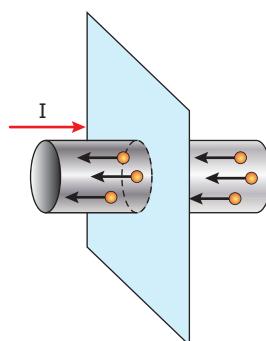



Figura 5: Nos metais, o sentido convencional da corrente elétrica é oposto ao movimento dos elétrons livres.

Agora, considere que N elétrons atravessem, em um intervalo de tempo Δt, a seção reta mostrada na figura 5. A carga total desses elétrons é o produto entre N e a carga elementar e = 1,6 x 10^{-19} C. No intervalo de tempo citado, a intensidade média da corrente elétrica na seção reta é definida pela seguinte razão:

$$I_{\text{média}} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{Ne}{\Delta t}$$

A unidade de corrente elétrica, no Sistema Internacional de Unidades, é:

$$\text{Unidade de corrente} = \frac{\text{coulomb}}{\text{segundo}} = \text{ampère (A)}$$

A equação da corrente é semelhante às outras equações de taxas que aprendemos na Física. A mais familiar, certamente, é a definição da velocidade média (razão entre a distância percorrida e o intervalo de tempo). Se um ônibus vai do Rio de Janeiro a São Paulo com uma velocidade média de 40 km/h, significa que ele percorre, em média, 40 km a cada hora de viagem. Semelhantemente, se uma pessoa toma um banho e a corrente média no chuveiro é 40 A (40 C/s), significa que, em média, 40 C de carga atravessam o chuveiro por segundo.

A área sob a curva do gráfico da velocidade em função do tempo fornece a distância percorrida. Semelhantemente, podemos calcular a carga que atravessa um circuito elétrico a partir da área sob a curva do gráfico da corrente em função do tempo. A figura 6 ilustra, por exemplo, a corrente em função do tempo durante o processo de carregamento do *flash* em uma máquina fotográfica. À medida que a carga é transferida da bateria da máquina para o *flash*, a corrente diminui de valor. A área sob a curva do gráfico é numericamente igual à carga acumulada no *flash*.

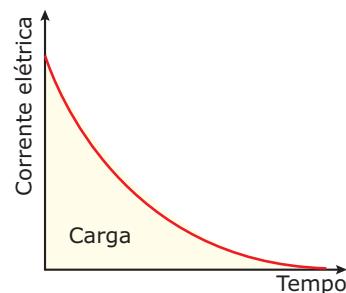



Figura 6: A área sob a curva do gráfico da corrente em função do tempo fornece a carga que atravessa o circuito.

MEDIÇÃO E CARÁTER ESCALAR DA CORRENTE

O valor de uma corrente elétrica pode ser medido por meio de um amperímetro. Por ora, pouco importa saber detalhes sobre esse instrumento, exceto que ele, ao ser inserido no fio em que passa uma corrente, é capaz de registrar

FÍSICA

o valor dessa corrente. A figura 7 mostra um multímetro, instrumento capaz de medir não apenas a corrente, como também a tensão e a resistência elétrica. Dependendo da posição da chave seletora e dos terminais em que os fios do circuito são conectados, a tela do multímetro fornece o valor da corrente, da voltagem ou da resistência elétrica.

Figura 7: Um multímetro para medição da corrente, da tensão elétrica (contínua e alternada) e da resistência.

Apesar de possuir um sentido, a corrente elétrica é uma grandeza escalar. Usamos setas na sua representação apenas para indicar o sentido do fluxo das cargas livres. Em nenhuma situação essas setas devem ser adicionadas como vetores. Por exemplo, a figura 8 mostra um circuito em que uma corrente $I_1 = 3,0$ A e outra $I_2 = 4,0$ A percorrem fios perpendiculares entre si. Dois amperímetros registram esses valores (simbolizados pelos círculos com os caracteres internos A_1 e A_2). Os fios estão conectados em um ponto P, no qual outro fio transporta a soma dessas correntes, dada por $I_3 = 3,0 + 4,0 = 7,0$ A (e não 5,0 A, resultado que obteríamos, erroneamente, caso fizéssemos a soma vetorial das correntes I_1 e I_2). Um terceiro amperímetro A_3 confirma o valor da corrente resultante. Esse resultado é coerente com o Princípio da Conservação da Carga Elétrica. Como não há criação e nem destruição de cargas na união dos fios, a cada 1 segundo, chegam 3 C e 4 C de cargas no ponto P, ao mesmo tempo que partem 7 C de cargas desse ponto.

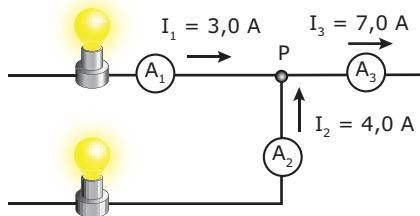



Figura 8: A corrente elétrica é uma grandeza escalar e deve ser somada algebricamente.

CORRENTE ALTERNADA

Um condutor é percorrido por uma corrente contínua (CC) quando o fluxo de cargas, através desse condutor, não sofre variações de sentido, desde que a fonte de tensão não seja alterada. Pilhas e baterias apresentam as polaridades fixas e, por isso, geram correntes contínuas. Quando a fonte de tensão apresenta uma inversão de polaridade, a corrente gerada é alternada (CA). Nesse caso, as cargas livres nos fios condutores ora se movem em um sentido, ora se movem em sentido oposto.

Em uma tomada elétrica, a corrente gerada é alternada. Um tipo simples de tomada possui dois terminais, o neutro e a fase. O neutro, como sugere o nome, é um terminal não eletrizado. A fase é um terminal eletrizado ora positivamente, ora negativamente. No Brasil, a rede elétrica apresenta uma alternância da fase igual a 60 vezes por segundo (frequência de 60 Hz), e as tomadas residenciais são de 127 V ou 220 V, dependendo da região do país. Na Europa, a frequência da rede elétrica é de 50 Hz, e a voltagem residencial é de 220 V.

Muitos aparelhos elétricos de sua casa podem funcionar com corrente alternada, como chuveiros, lâmpadas (de filamento ou fluorescentes) e ventiladores. O carregador de bateria dos telefones celulares e os circuitos eletrônicos de rádios, televisores, sons e computadores funcionam com corrente contínua de baixa intensidade. Embora esses aparelhos sejam ligados diretamente em tomadas, eles possuem um conversor de CA em CC, que, primeiramente, abaixa a tensão, e, em seguida, converte a corrente de alternada para contínua. A diminuição da tensão é realizada por um transformador interno. Estudaremos o funcionamento desse equipamento em outro momento. A transformação da corrente alternada em contínua é feita com o uso de capacitores e de diodos. Este é uma válvula unidirecional que permite o fluxo de cargas apenas em um sentido.

A corrente alternada é usada em grande escala em quase todas as partes do mundo. A sua geração é feita a tensões médias nas usinas de eletricidade. Na saída das usinas, transformadores gigantescos elevam a tensão a milhares de volts. Nessa condição, a energia elétrica pode ser transportada a longas distâncias, com poucas perdas por aquecimento na fiação. Perto das cidades e próximo das casas, transformadores reduzem a tensão para os valores residenciais.

O gráfico mostrado na figura 9 ilustra a variação da tensão em uma tomada elétrica, e a corrente elétrica que flui por uma lâmpada ligada nessa tomada. Observe que a tensão oscila entre os valores +180 V e −180 V, indicando que a polaridade da tomada muda constantemente. A corrente elétrica também oscila entre valores positivos e negativos, pois ela alterna de sentido muitas vezes por segundo. Observe a linha horizontal pontilhada no gráfico da tensão, indicando o valor 127 V característico de uma tomada residencial. Esse valor é chamado de tensão eficaz, calculada por meio da razão entre a tensão máxima e a raiz quadrada de 2. A tensão eficaz é uma espécie de valor médio.

Se uma lâmpada fosse alimentada por uma tensão constante de 127 V, o seu funcionamento seria praticamente igual ao caso real, em que ela recebe a tensão alternada da tomada. A corrente elétrica também apresenta um valor eficaz, baseado em fundamentos semelhantes ao caso da tensão. Em geral, os multímetros são fabricados para medir os valores eficazes da tensão e da corrente. Como veremos na sequência deste módulo, muitos problemas sobre lâmpadas e outros aparelhos elétricos podem ser resolvidos por meio dos valores eficazes da corrente e da tensão alternada.

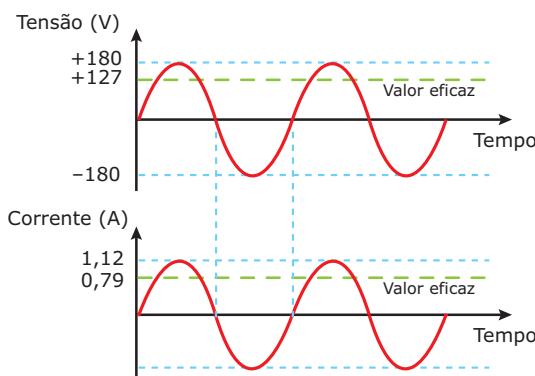



Figura 9: Gráfico da tensão alternada e da corrente alternada correspondente para uma lâmpada de 100 W.

PARA REFLETIR

Quando a corrente alternada muda de sentido, o seu valor se anula momentaneamente. Por que isso não constitui um problema para os equipamentos alimentados por ela, como um ventilador, um chuveiro ou uma lâmpada?

CONCEITO FÍSICO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A intensidade da corrente elétrica em um condutor depende da voltagem aplicada a ele e também da resistência elétrica que esse condutor oferece ao fluxo de cargas. A resistência elétrica existe porque as cargas livres em movimento chocam-se constantemente contra a estrutura atômica do condutor.

Um fio longo possui uma resistência elétrica maior que um fio curto feito do mesmo material e com a mesma seção reta. Fios finos apresentam maior resistência que fios espessos, feitos de mesmo material e com o mesmo comprimento. Fios de mesmo comprimento e de mesma espessura, mas de materiais diferentes, apresentam, em geral, resistências diferentes. A prata é melhor condutora que o cobre, que, por sua vez, é melhor condutor que o alumínio. A resistência de um condutor depende, portanto, do material do qual ele é feito e também de sua geometria.

A resistência elétrica de um condutor depende também da sua temperatura. Quando a temperatura de um condutor aumenta, a agitação atômica aumenta, favorecendo o aumento do número de colisões das cargas livres contra a rede atômica. Por isso, em geral, a capacidade de conduzir eletricidade fica prejudicada quando um condutor é aquecido. O carbono é uma exceção. Quando a temperatura aumenta, mais átomos de carbono perdem elétrons, aumentando a sua condutividade. Como o ponto de fusão do carbono é muito alto, é possível aumentar consideravelmente a condutividade do carbono sem risco de fusão do material.

Em temperaturas suficientemente baixas, determinados materiais, conhecidos como supercondutores, apresentam resistência elétrica nula. Isso significa que uma ínfima voltagem é capaz de gerar correntes de grande intensidade em um supercondutor. Além disso, uma vez estabelecida a corrente, esta fluirá indefinidamente pelo condutor, mesmo depois de a fonte de voltagem ser desconectada.

VALOR DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A seguir, vamos quantificar a resistência elétrica de um condutor. Para isso, considere o condutor de comprimento L e seção reta de área A mostrado na figura 10.

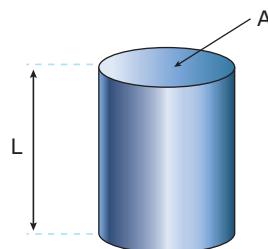



Figura 10: Condutor de seção reta A e comprimento L.

Para uma diferença de potencial aplicada entre a extremidade superior e a extremidade inferior desse condutor, a resistência elétrica R é dada por:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Nessa equação, ρ é a resistividade elétrica do material do condutor. Materiais de baixa condutividade elétrica apresentam maior resistividade elétrica. Observe que a equação para calcular a resistência elétrica é coerente com a discussão apresentada no tópico anterior, pois a resistência de um condutor é proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à sua seção reta.

No Sistema Internacional, a unidade de resistência elétrica é o ohm, cujo símbolo é a letra grega Ω. Esse nome é uma homenagem ao físico alemão George Simon Ohm, que, além da relação anterior, descobriu também uma relação simples e fundamental entre a voltagem, a corrente e a resistência elétrica, como veremos no próximo tópico.

No Sistema Internacional, a resistividade elétrica é dada em Ωm. A tabela a seguir contém a resistividade elétrica de alguns materiais à temperatura ambiente. O aço níquel-cromo é usado para fabricar os fios de resistências usados, por exemplo, nos chuveiros elétricos. Observe como a resistividade elétrica dos metais é pequena, enquanto a da borracha é quase infinita. Esses valores são coerentes com o fato de os metais serem bons condutores e a borracha ser um isolante elétrico.

Material	Resistividade ρ (Ωm) a 20 °C
Cobre	$1,7 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,8 \times 10^{-8}$
Aço níquel-cromo	100×10^{-8}
Carbono	$3\,500 \times 10^{-8}$
Borracha	10^{13} a 10^{16}

Se o cilindro da figura 10 for feito de cobre e suas dimensões forem L = 10 cm e A = 50 cm², a sua resistência elétrica ao longo do comprimento será:

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{1,7 \times 10^{-6}\ \Omega\text{cm}.10\ \text{cm}}{50\ \text{cm}^2} = 3,4 \times 10^{-7}\,\Omega$$

Essa resistência é muito baixa. Ainda que os fios de cobre sejam mais longos e finos que esse cilindro, eles podem apresentar uma resistência elétrica baixa. Por isso, a resistência elétrica dos fios de ligação usados nos circuitos elétricos é, quase sempre, desprezada.

RELAÇÃO ENTRE VOLTAGEM, CORRENTE E RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A resistência R de um condutor é definida pela relação entre a voltagem V_{AB} aplicada entre as suas extremidades e a corrente elétrica I que é estabelecida no condutor.

$$R = \frac{V_{AB}}{I}$$

Nessa equação, observe que a corrente aparece no denominador. Assim, para uma voltagem fixa, condutores de alta resistência serão percorridos por baixas correntes e vice-versa. Esse resultado é coerente com a ideia de que a resistência elétrica é um limitador da corrente. Ainda de acordo com essa definição, conclui-se que a resistência elétrica também pode ser expressa na unidade volt por ampère. Se um condutor tiver uma resistência elétrica de 10 Ω (10 V/A), significa que ele será percorrido por uma corrente de 1 A, caso seja submetido a uma tensão de 10 V.

A figura 11 mostra um dispositivo experimental que permite determinar a resistência R_L do filamento de uma lâmpada com a ajuda da definição anterior. A leitura do voltímetro fornece a voltagem V_{AB} aplicada na lâmpada, e a leitura do amperímetro fornece o valor da corrente I que passa na lâmpada. Se, por exemplo, esses valores forem iguais a 12 V e 0,40 A, então, a resistência da lâmpada será $R_L = 12/0,40 = 30\ \Omega$.

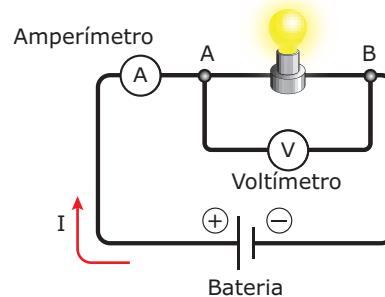



Figura 11: Montagem para determinar a resistência do filamento de uma lâmpada.

A expressão R = V/I também pode resolver problemas envolvendo aparelhos ligados às voltagens alternadas (e não constantes). Para isso, devemos pensar nos valores eficazes médios da voltagem e da corrente discutidos anteriormente. Assim, por exemplo, em uma casa em que a tensão elétrica vale 120 V, podemos avaliar os valores das resistências do chuveiro (R_C) e de uma lâmpada incandescente padrão (R_L), pela equação anterior. Os valores típicos para as correntes eficazes do chuveiro e da lâmpada são 40 A e 0,50 A, respectivamente (justificaremos esses valores na parte final deste módulo). Portanto, as resistências elétricas nesses elementos valem:

$$R_C = \frac{120}{40} = 3,0\ \Omega \quad \text{e} \quad R_L = \frac{120}{0,50} = 240\ \Omega$$

A resistência de um chuveiro é muito menor que a de uma lâmpada padrão. Isso não significa que as colisões dos elétrons livres contra a rede atômica do resistor do chuveiro sejam mais escassas. Pelo contrário, a menor resistência permite que a velocidade de migração dos elétrons seja maior, favorecendo o aumento na taxa de colisões e na energia dissipada nos impactos. Você pode fazer uma analogia disso com a seguinte situação: um aluno sai de uma sala repleta de carteiras espalhadas (existe muita resistência pelo caminho). Se esse aluno caminhar devagar, ele passará pelas carteiras sem colidir com elas. Agora, imagine a sala com poucas carteiras (pouca resistência), mas com o aluno saindo correndo. Nesse caso, a chance de ele colidir contra as carteiras se torna maior.

A LEI DE OHM

Além do estudo sobre a resistência elétrica apresentado nos tópicos anteriores, Ohm também descobriu que certos condutores, sobretudo os metais, apresentam a resistência elétrica constante, independentemente da voltagem aplicada a eles. Realizando experiências com determinados condutores, Ohm verificou que, aplicando uma voltagem V, o condutor era percorrido por uma corrente de intensidade I, se a voltagem fosse 2V, a corrente tornava-se 2I, e assim por diante. Como a razão entre a voltagem e a corrente representa a resistência elétrica do condutor, Ohm concluiu que esses condutores apresentavam uma resistência que não dependia da voltagem. Quando um material apresenta esse comportamento, dizemos que ele obedece à Lei de Ohm. Um material que segue essa lei é chamado de condutor ôhmico.

Como V = RI, e como R é constante, o gráfico da voltagem aplicada a um condutor ôhmico em função da corrente elétrica que o atravessa é uma reta que passa pela origem. O valor constante da resistência é igual ao quociente entre voltagem e corrente para qualquer ponto da reta (como a reta passa pela origem, esse quociente também é a inclinação da reta). A figura 12 mostra as curvas características de dois condutores I e II. O primeiro condutor é ôhmico e a sua resistência vale 12 Ω, como pode ser calculado facilmente. O segundo condutor não é ôhmico. Cuidado! A inclinação da curva característica desse condutor não fornece o valor da resistência, embora R possa ser calculada para qualquer ponto (à exceção da origem) por meio da relação R = V/I. Por exemplo, para o ponto A, indicado sobre a curva, o condutor II apresenta resistência R = 12/0,50 = 24 Ω. No ponto B, apesar de a inclinação da curva ser nula, a resistência do condutor não é zero, mas sim R = 18/1,5 = 12 Ω.

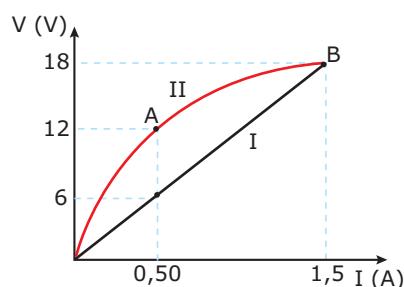



Figura 12: Curvas características, à temperatura constante, de um condutor ôhmico (I) e um condutor não ôhmico (II).

A equação para calcular a resistência em função da geometria e da resistividade do condutor ($R = \rho L/A$) refere-se a condutores ôhmicos, uma vez que a resistência dada por essa expressão não leva em conta o valor da voltagem. Em uma experiência para comprovar o comportamento ôhmico de um condutor, é essencial manter a temperatura do condutor constante. Caso contrário, a variação dessa temperatura alteraria a resistividade elétrica do material e, consequentemente, o valor da resistência elétrica.

A figura 13 mostra a curva da voltagem em função da corrente em uma lâmpada de 100 W. O filamento da lâmpada é uma liga de tungstênio que segue a Lei de Ohm. O comportamento não linear observado é causado pelo aumento de temperatura do filamento, que ocorre à medida que a lâmpada é submetida a voltagens maiores, e não pelo fato de o filamento não obedecer à Lei de Ohm.

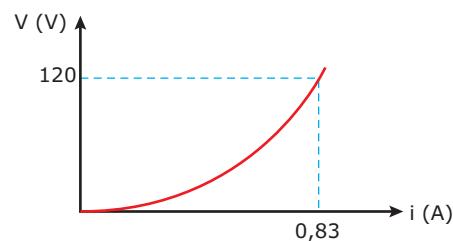



Figura 13: O filamento da lâmpada obedece à Lei de Ohm, mas o seu aquecimento dificulta essa comprovação.

EFEITOS FISIOLÓGICOS DA CORRENTE ELÉTRICA

Um choque elétrico é o resultado da passagem de uma corrente elétrica pelo corpo humano. O efeito danoso do choque é função da intensidade da corrente, de sua duração e da parte do corpo na qual ela passa. A circulação de uma corrente de apenas 0,070 A através do coração, por mais de 1 s, pode ser fatal. Correntes significativas podem atravessar a mão, indo de um dedo a outro, sem deixar maiores sequelas. Os seguintes caminhos da corrente elétrica estão na ordem crescente de risco para o corpo: de uma mão para a própria mão, da mão direita para o pé direito, da mão esquerda para o pé esquerdo e de uma mão para a outra, como ilustra a figura 14.

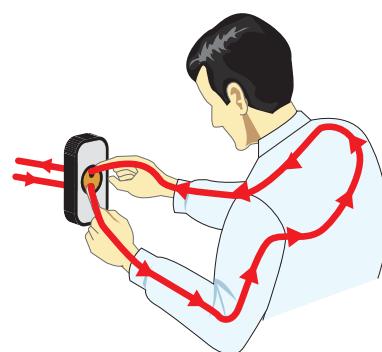
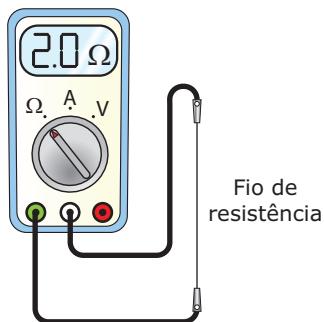



Figura 14: Corrente de alto risco indo de uma mão a outra, através do coração.

FÍSICA

A intensidade da corrente através de um meio condutor depende da voltagem e da resistência elétrica desse meio. Em geral, a resistência elétrica do corpo humano vale alguns milhares de ohms, desde que a pele esteja bem seca. Se o corpo estiver muito suado, a resistência pode cair para poucas centenas de ohms. Se estiver molhado com água salgada, a resistência elétrica de partes do corpo pode não passar de alguns ohms. Dependendo das condições da pele, a corrente que atravessa o corpo pode variar significativamente para uma mesma voltagem. Uma voltagem de 127 V pode gerar uma corrente muito perigosa através de um corpo molhado. Por isso, regular a temperatura da água do chuveiro durante o banho não é aconselhável. Faça essa regulagem antes de começar seu banho, enquanto você está com o corpo seco e, de preferência, com os pés calçados com chinelos de borracha.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Usando um ohmímetro, um estudante mediu a resistência de um fio de aço níquel-cromo de comprimento L = 10 cm. A figura mostra esse registro. A seguir, o estudante mergulhou o fio em um béquer com água e alimentou-o com uma bateria de 12 V. Assim que a água começou a aquecer, o fio foi retirado do líquido com a fonte de tensão elétrica fornecendo corrente. Então, o fio ficou rubro e, logo após, rompeu-se.

O estudante tirou as seguintes conclusões (todas corretas):

1. O diâmetro do fio vale 0,25 mm.
2. A corrente no fio imerso foi, aproximadamente, de 6,0 A.
3. Ao ar livre, a corrente foi menor que 6,0 A.

Justificar as conclusões tiradas pelo estudante.

Resolução:

O diâmetro do fio pode ser avaliado por meio da relação:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

À temperatura ambiente, a resistência R e a resistividade ρ do fio valem 2,0 Ω e 100 x 10^{-6} Ωcm. Substituindo esses valores na equação anterior, obtemos a área A da seção reta do fio:

$$2{,}0 = \frac{100 \times 10^{-6}.10}{A} \Rightarrow A = 5{,}0 \times 10^{-4}\ cm^2$$

Então, o diâmetro do fio é:

$$A = \pi d^2/4 \Rightarrow 5{,}0 \times 10^{-4} = 3{,}14.d^2/4$$

$$d = 0{,}025\ cm = 0{,}25\ mm$$

Imerso em água, o calor gerado no fio é facilmente dissipado no líquido. Por isso, a temperatura do fio aumenta pouco, e a sua resistência praticamente não sofre variação. A corrente, então, pode ser calculada pela razão entre a voltagem da bateria e a resistência registrada à temperatura ambiente:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12}{2{,}0} = 6{,}0\ A$$

Depois que o fio foi retirado da água, o calor gerado passou a ser dissipado para o ar, em uma taxa muito baixa. Por isso, a temperatura e a resistência do fio aumentaram. O fio se rompeu em uma posição em que o ponto de fusão do fio foi atingido. Antes de o fio se romper, a corrente nele era menor que 6,0 A, porque sua resistência elétrica tornou-se maior que a resistência medida à temperatura ambiente (2,0 Ω).

A CORRENTE E A ENERGIA ELÉTRICA

A corrente elétrica é um fluxo de cargas que transporta energia elétrica de um lugar a outro. Quando a corrente passa por um equipamento elétrico ou eletrônico, parte da energia elétrica transportada por essa corrente é convertida em outras formas de energia. Em uma lâmpada, parte da energia elétrica converte-se em luz. Em uma televisão, uma grande parcela da energia elétrica transforma-se em luz e som. A figura 15 mostra alguns exemplos de transformação da energia elétrica em uma casa.

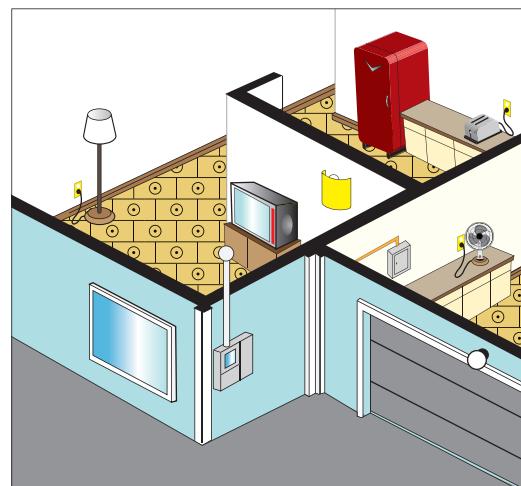



Figura 15: Transformação de energia em uma casa.

Para quantificar a conversão de energia elétrica em um equipamento, considere a figura 16. Ela mostra um pequeno motor, cujos terminais A e B estão ligados aos polos de duas pilhas. O potencial elétrico V_A é maior que o potencial V_B. Por isso, a corrente convencional atravessa o motor de A para B.

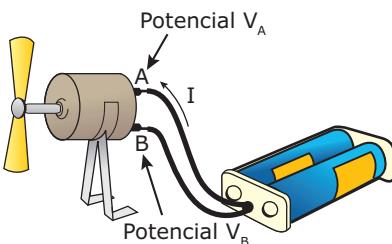



Figura 16: Transformação de energia em um motor.

No terminal A, uma carga q possui uma energia potencial elétrica $E_A = qV_A$. Em B, depois de atravessar o motor, a energia da carga é menor e vale $E_B = qV_B$. A diferença entre esses dois valores representa a parcela da energia elétrica convertida em energia cinética para girar o motor, em calor, devido à resistência elétrica interna do motor, e em energia magnética devido aos efeitos magnéticos da corrente (esses efeitos serão vistos posteriormente). Matematicamente, a transformação da energia elétrica no motor é:

$$\text{Energia elétrica convertida} = q(V_A - V_B) = qV_{AB}$$

V_{AB} é a notação compacta para a tensão elétrica. Agora, se dividirmos essa equação pelo tempo Δt que a carga q gasta para atravessar o motor, obteremos a taxa de transformação da energia elétrica, que é chamada de potência elétrica P. Como a razão $q/\Delta t$ é a corrente I, a expressão da potência P é dada por:

$$P = V_{AB}I$$

Essa equação pode ser usada para calcular a potência elétrica em qualquer aparelho elétrico, seja ele alimentado por uma corrente contínua ou por uma corrente alternada. No último caso, em geral, usamos os valores eficazes da tensão e da corrente e obtemos o valor eficaz da potência.

Considere, por exemplo, que uma televisão contenha as seguintes especificações: 127 V / 250 W. Esses valores indicam que o aparelho, ligado em 127 V, despende uma potência de 250 W (lê-se 250 watts). Como você sabe, 1 W = 1 J/s. Assim, nessa televisão, 250 J de energia elétrica são transformados basicamente em energias sonora, luminosa e calorífica, a cada 1 segundo de funcionamento do aparelho. A corrente que entra (e a que sai) no aparelho pode ser calculada por meio da relação entre potência, corrente e voltagem:

$$P = V_{AB}I \quad \Rightarrow \quad 250 = 127.I \quad \Rightarrow \quad I = 1{,}97\ A$$

O EFEITO JOULE

Quando uma corrente elétrica passa por um condutor, as cargas livres colidem constantemente contra a rede atômica. Por isso, a energia elétrica é transformada em energia térmica. Essa transformação de energia é conhecida pelo nome de efeito Joule. Esse efeito ocorre em qualquer condutor ou equipamento em que flui uma corrente elétrica. A maior parte da energia elétrica consumida pelo motor da figura 16 é convertida em energia cinética de rotação, mas uma parcela significativa da energia elétrica é transformada em energia térmica, devido à resistência elétrica da bobina do motor (um fio de cobre longo e fino enrolado em torno de um núcleo).

Nas fiações dos circuitos e na maioria dos aparelhos elétricos, a ocorrência do efeito Joule é inconveniente. Entretanto, alguns dispositivos elétricos são construídos especificamente para converter a energia elétrica em energia térmica. Esse é o caso das resistências de chuveiros, torradeiras de pão, aquecedores elétricos de ambientes, etc. Uma lâmpada incandescente também pode ser considerada um elemento de resistência. A emissão de luz ocorre com o filamento da lâmpada a uma temperatura próxima de 3 000 ºC.

A relação R = V/I pode ser substituída na equação da potência. Isso nos conduz a duas equações alternativas para o cálculo da potência de elementos resistivos:

$$P = RI^2 \text{ ou } P = \frac{V^2}{R}$$

Alguns estudantes fazem um pouco de confusão com essas equações. A primeira equação parece sugerir que o efeito Joule diminui quando a resistência diminui, enquanto a segunda parece sugerir exatamente o contrário. Note que, além de depender da resistência, a potência depende também da tensão e da corrente elétrica. Por isso, para analisarmos a relação entre a potência e a resistência, antes é necessário especificar qual grandeza, tensão ou corrente é prescrita. A seguir, apresentamos duas situações, uma em que a tensão é mantida constante e a outra com a corrente mantida constante.

Nas casas, a tensão entre a fase e o neutro é fixa, ela vale 127 volts ou 220 volts, dependendo da região do país. Como a tensão V é constante, podemos aplicar a equação $P = V^2/R$ e concluir que P é inversamente proporcional a R. Um chuveiro apresenta resistência elétrica muito menor que a resistência de uma lâmpada incandescente. Como esses dispositivos são alimentados pela mesma tensão, a potência do chuveiro deve ser muito maior que a da lâmpada.

Quando a corrente elétrica I em dois elementos resistivos for igual, a potência P de cada elemento será diretamente proporcional à sua resistência R, segundo a expressão $P = RI^2$. O filamento de uma lâmpada é percorrido pela mesma corrente elétrica que passa pelos fios que ligam a lâmpada a uma tomada. Desde que a fiação apresente uma espessura suficientemente grande, a sua resistência elétrica será desprezível se comparada à da lâmpada. Por isso, apenas o filamento da lâmpada fica incandescente, e o efeito Joule na fiação é desprezível.

O QUILOWATT-HORA

No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de potência é o watt (W) e a unidade de energia é o joule (J). O quilowatt-hora (kWh) é outra unidade de energia, usada comumente para medir o consumo mensal de energia elétrica nas residências. Esse consumo, para uma família padrão (4 pessoas) de classe média, oscila em torno de 400 kWh. A relação entre o joule e o quilowatt-hora pode ser obtida da seguinte forma:

$$1\ \text{kWh} = 10^3\ \frac{\text{J}}{\text{s}}\ .\ 3\ 600\ \text{s} = 3{,}6 \times 10^6\ \text{J}$$

Veja como é fácil e prático calcular o consumo de energia elétrica em kWh. Imagine que uma lâmpada de 100 W (0,100 kW) da varanda de uma casa seja deixada acesa das 18 horas até as 6 horas da manhã, todos os dias, durante o mês, o que representa 12 horas de uso diário e 360 horas de uso mensal (12.30). Então, o consumo mensal da lâmpada é:

$$\text{Consumo} = 0{,}100\ \text{kW}.360\ \text{h} = 36\ \text{kWh}$$

A um custo de 50 centavos por kWh, o custo para manter a lâmpada funcionando todos os dias no mês é igual a R$ 18,00.

A figura 17 mostra um registrador do consumo de energia elétrica. O registro é acumulativo, semelhante à marcação de quilometragem dos painéis dos carros. O funcionário da companhia de eletricidade anota as leituras em dois meses consecutivos, no mesmo dia do mês. Assim, a diferença entre esses valores fornece o consumo nos últimos 30 dias.

Figura 17: Medidor de consumo de energia elétrica em kWh.

PARA REFLETIR

Usando o medidor de consumo de energia elétrica, como você poderia fazer para confirmar a potência elétrica especificada em uma lâmpada da sua casa?

EXERCÍCIO RESOLVIDO

02. A tabela fornece uma lista de equipamentos elétricos de uma casa e as horas de uso diário. O circuito do banheiro é constituído pelo chuveiro e por uma lâmpada. A voltagem na casa é igual a 120 V.

Equipamentos	Horas por dia
Rádio de 20 W	5
Ferro de passar de 1 000 W	0,5
Televisor de 150 W	4
Geladeira de 150 W	10
5 lâmpadas de 60 W	6
Chuveiro de 5 000 W	1

A) Calcular o valor pago na conta mensal de luz dessa casa, se 1 kWh custa R$ 0,70.

B) Calcular a corrente máxima que o disjuntor do banheiro permite sem interromper o fluxo de eletricidade.

C) Calcular a resistência do ferro de passar.

Resolução:

A) Primeiramente, vamos calcular o consumo em kWh por mês:

Consumo = (0,020.5 + 1.0,5 + 0,150.4 + 0,150.10 + 5.0,060.6 + 5.1).30 = 285 kWh

O valor pago por essa energia é dado pelo produto entre 285 kWh e 0,70 reais. O resultado é R$ 199,50.

B) A potência elétrica total no banheiro é a soma da potência do chuveiro com a potência de uma lâmpada: 5 060 W. Como a voltagem na casa é 120 V, a corrente no circuito do banheiro é:

$$P = VI \Rightarrow 5\ 060 = 120.I \Rightarrow I = 42{,}2\ \text{A}$$

No mercado, os disjuntores mais próximos dessa corrente são de 40 A e 45 A. Nesse caso, o disjuntor de 45 A deve ser escolhido, apesar de o valor da corrente ser mais próximo de 40 A. Caso o disjuntor de 40 A fosse instalado, o circuito do banheiro "cairia" sempre que o chuveiro e a lâmpada estivessem funcionando ao mesmo tempo.

C) A resistência do ferro pode ser calculada por meio da seguinte relação:

$$P = \frac{V^2}{R} \Rightarrow 1\ 000 = \frac{120^2}{R} \Rightarrow R = 14{,}4\ \Omega$$

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (UEL-PR–2008) A capacidade de carga das pilhas e baterias é dada na unidade Ah (ampère-hora). Se uma bateria de automóvel possui aproximadamente 44,4 Ah de capacidade de carga, qual a capacidade de carga (q) em coulomb (C) e o número de elétrons (n) que ela pode fornecer? Considere e = 1, 6 × 10^{-19} C.

A) q = 16 x 10^5 C, n = 10 × 10^{14} elétrons.

B) q = 160 × 10^5 C, n = 10 × 10^{24} elétrons.

C) q = 1,6 × 10^5 C, n = 1 × 10^{24} elétrons.

D) q = 1,6 × 10^4 C, n = 1 × 10^{14} elétrons.

E) q = 16 × 10^4 C, n = 1 × 10^{19} elétrons.

02. (FUVEST-SP–2010) Medidas elétricas indicam que a superfície terrestre tem carga elétrica total negativa de, aproximadamente, 600 000 coulombs. Em tempestades, raios de cargas positivas, embora raros, podem atingir a superfície terrestre. A corrente elétrica desses raios pode atingir valores de até 300 000 A. Que fração da carga elétrica total da Terra poderia ser compensada por um raio de 300 000 A e com duração de 0,5 s?

A) 1/2

B) 1/3

C) 1/4

D) 1/10

E) 1/20

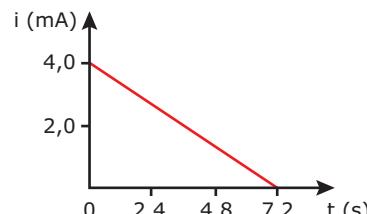
03. (UERJ) Num detector de mentiras, uma tensão de 6 V é aplicada entre os dedos de uma pessoa. Ao responder a uma pergunta, a resistência entre os seus dedos caiu de 400 kΩ para 300 kΩ. Nesse caso, a corrente no detector apresentou variação, em μA, de

A) 5.

B) 10.

C) 15.

D) 20.

04. (UFSC–2007) Assinale a(s) proposição(ões) **CORRETA(S)**.

01. Para a maioria dos metais, a resistividade diminui quando há um aumento na temperatura.

02. Para um condutor ôhmico, um aumento de tensão corresponde a um aumento proporcional de corrente elétrica.

04. Para dois condutores de mesmo material e mesmo comprimento, sendo que um tem o dobro da área de seção do outro, teremos uma mesma intensidade de corrente se aplicarmos a mesma tensão sobre ambos.

08. A dissipação de energia por efeito Joule num resistor depende do sentido da corrente e independe da tensão aplicada sobre ele.

16. Ao se estabelecer uma corrente elétrica num fio metálico submetido a uma certa tensão contínua, teremos prótons se movendo do polo positivo ao negativo.

32. Os metais geralmente são bons condutores de eletricidade e de calor.

Soma (   )

05. (UFOP-MG–2009) Em uma residência, Dona Maria, insatisfeita com o seu chuveiro elétrico (1 100 W e 110 V), chamou um eletricista para ajudá-la. O profissional diminuiu o comprimento do resistor pela metade. Com base nessas informações, responda:

A) Qual o valor da resistência antes e depois de cortá-la?

B) Qual será a nova potência do chuveiro?

C) Supondo-se que o chuveiro seja utilizado uma hora por dia e que o custo do quilowatt-hora é de R$ 0,10, qual será o custo total ao final do mês?

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (UFSCar-SP–2008) O capacitor é um elemento de circuito muito utilizado em aparelhos eletrônicos de regimes alternados ou contínuos. Quando seus dois terminais são ligados a uma fonte, ele é capaz de armazenar cargas elétricas. Ligando-o a um elemento passivo, como um resistor, ele se descarrega. O gráfico representa uma aproximação linear da descarga de um capacitor.

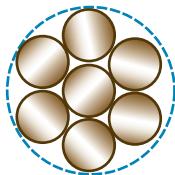
Sabendo que a carga elétrica fundamental tem valor 1,6 x 10^{-19} C, o número de portadores de carga que fluíram durante essa descarga está mais próximo de

A) 10^{17}.

B) 10^{14}.

C) 10^{11}.

D) 10^8.

E) 10^5.

02. (UFMG) Uma lâmpada fluorescente contém em seu interior um gás que se ioniza após a aplicação de alta tensão entre seus terminais. Após a ionização, uma corrente elétrica é estabelecida, e os íons negativos deslocam-se com uma taxa de 1,0 x 10^{18} íons/segundo para o polo A. Os íons positivos se deslocam, com a mesma taxa, para o polo B.

A carga de cada íon positivo é 1,6 x 10^{-19} C. Pode-se dizer que a corrente elétrica na lâmpada será

A) 0,16 A.

B) 0,32 A.

C) 1,0 x 10^{18} A.

D) nula.

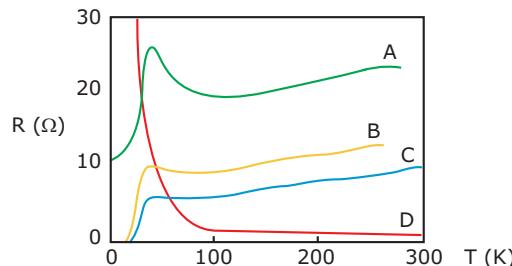
03. (Mackenzie-SP–2006) Para a transmissão de energia elétrica, constrói-se um cabo composto por 7 fios de uma liga de cobre de área de seção transversal 10 mm^2 cada um, como mostra a figura. A resistividade da liga de cobre é 2,1 x 10^{-2} $\Omega.mm^2/m$. A resistência elétrica desse cabo, a cada quilômetro, é

A) 2,1 Ω.

B) 1,8 Ω.

C) 1,2 Ω.

D) 0,6 Ω.

E) 0,3 Ω.

04. (UFMG) A figura mostra um cabo telefônico. Formado por dois fios, esse cabo tem 5,00 km de comprimento.

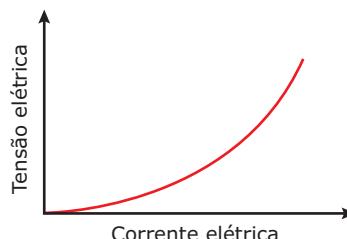
Constatou-se que, em algum ponto ao longo do comprimento desse cabo, os fios fizeram contato elétrico entre si, ocasionando um curto-circuito. Para descobrir o ponto que causa o curto-circuito, um técnico mede as resistências entre as extremidades P e Q, encontrando 20,0 Ω, e entre as extremidades R e S, encontrando 80,0 Ω. Com base nesses dados, é **CORRETO** afirmar que a distância das extremidades PQ até o ponto que causa o curto-circuito é de

A) 1,25 km.

B) 4,00 km.

C) 1,00 km.

D) 3,75 km.

05. (PUC Rio) O gráfico seguinte representa a resistência em função da temperatura T de 4 materiais diferentes denominados A, B, C e D.

Considere as seguintes afirmações:

I. Os materiais B e C apresentam comportamento metálico, tornando-se supercondutores a baixas temperaturas.

II. O material D é isolante a baixas temperaturas.

III. Na temperatura ambiente, o material A é o pior condutor.

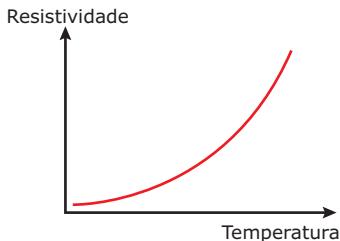
As afirmações **CORRETAS** são

A) I, II e III.

B) I e II.

C) II e III.

D) I e III.

E) N.d.a.

06. (UFMG) O gráfico a seguir mostra como varia a tensão elétrica em um resistor mantido a uma temperatura constante, em função da corrente elétrica que passa por esse resistor.

Com base nas informações contidas no gráfico, é **CORRETO** afirmar que

A) a corrente elétrica no resistor é diretamente proporcional à tensão elétrica.

B) a resistência elétrica do resistor aumenta quando a corrente elétrica aumenta.

C) a resistência elétrica do resistor tem o mesmo valor, qualquer que seja a tensão elétrica.

D) dobrando-se a corrente elétrica através do resistor, a potência elétrica consumida quadruplica.

E) o resistor é feito de um material que obedece à Lei de Ohm.

07. (UFSCar-SP–2007) O gráfico mostra como a resistividade de determinado material varia, conforme a temperatura de um resistor é aumentada.

Considere desprezíveis as alterações nas dimensões do fio, dadas pela variação de temperatura, e responda.

Dos gráficos seguintes, aquele que pode representar a variação da potência elétrica dissipada por um fio resistivo cilíndrico, feito desse material e mantido sob uma diferença de potencial constante, é

08. (UFOP-MG) Um estudante de Brasília, onde a diferença de potencial é 220 V, tem a felicidade de passar no vestibular e vem estudar em Ouro Preto, onde a diferença de potencial é 110 V. Para que o velho tostador de pão, que ele carrega para toda parte, tenha o mesmo desempenho em Ouro Preto, a sua resistência elétrica deve ser

A) dobrada.
B) quadruplicada.
C) reduzida a um quarto.
D) reduzida à metade.

09. (Unimontes-MG) Uma empresa de energia elétrica resolve, num período de 30 dias, diminuir a tensão elétrica fornecida às residências em 10% (de 120 V para 108 V). Numa determinada residência, um chuveiro elétrico, cujos dados nominais são 120 V – 4 000 W, é utilizado 30 minutos por dia, todos os dias. O uso desse chuveiro, nesses 30 dias, sob a tensão de 108 V, representará, no consumo de energia elétrica,

A) um aumento de 11,4 kWh.
B) um aumento de 3,2 kWh.
C) uma diminuição de 3,2 kWh.
D) uma diminuição de 11,4 kWh.

10. (UFF-RJ–2007) Nas instalações elétricas residenciais urbanas, na cidade de Niterói, os eletrodomésticos são ligados a tomadas com 110 V de tensão. Uma notável exceção é o aparelho de ar condicionado, de alta potência, que é preferencialmente ligado a tomadas de 220 V de tensão. Considere 2 aparelhos de ar condicionado, de igual potência nominal, projetados para operar: um, em 110 V, e o outro, em 220 V. Assinale a opção que **MELHOR** justifica a escolha do aparelho projetado para operar em 220 V.

A) Como a corrente é, nesse caso, menor, o choque elétrico provocado por algum acidente ou imprudência será também menos perigoso.
B) Como a corrente é, nesse caso, menor, a dissipação por efeito Joule na fiação é também menor, resultando em economia no consumo de energia elétrica.
C) Como a corrente é, nesse caso, maior, o aparelho de ar condicionado refrigerará melhor o ambiente.
D) Como a corrente é, nesse caso, maior, a dissipação por efeito Joule na fiação será menor, resultando em economia no consumo de energia elétrica.
E) A corrente é igual nos 2 casos, mas a potência real do aparelho de ar condicionado, que é o produto da tensão pela corrente, é maior quando a tensão é maior.

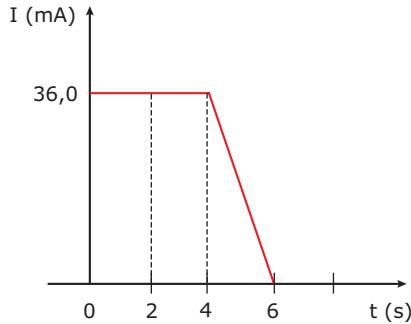
11. (FURG-RS–2006) As lâmpadas de uma casa, ligadas a uma tensão de 110 V, queimam com muita frequência. A dona da casa pensa em adquirir lâmpadas de 130 V ao invés de 110 V, como é habitual, porque acredita que estas terão maior durabilidade. Esse procedimento será

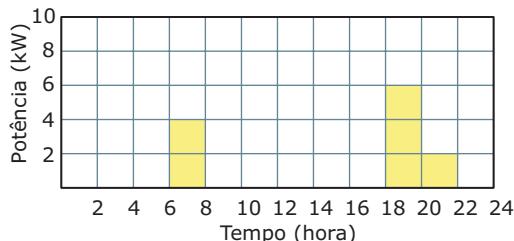
A) válido, porém as lâmpadas terão luminosidade reduzida.
B) impossível, pois as lâmpadas queimarão imediatamente.
C) perigoso, pois sobrecarregará a rede elétrica.
D) inútil, pois as lâmpadas não vão acender.
E) vantajoso, pois as lâmpadas terão maior luminosidade.

12. (UNIFESP–2008) Um consumidor troca a televisão de 29 polegadas e 70 W de potência por uma de plasma de 42 polegadas e 220 W de potência. Se em sua casa se assiste televisão durante 6,0 horas por dia, em média, pode-se afirmar que o aumento de consumo mensal de energia elétrica que essa troca vai acarretar é, aproximadamente, de

A) 13 kWh.
B) 27 kWh.
C) 40 kWh.
D) 70 kWh.
E) 220 kWh.

13. (VUNESP) As companhias de eletricidade geralmente usam medidores calibrados em quilowatt-hora (kWh). Um kWh representa o trabalho realizado por uma máquina desenvolvendo potência igual a 1 kW durante 1 hora. Numa conta mensal de energia elétrica de uma residência com quatro moradores, leem-se, entre outros, os seguintes valores:

Consumo	Total a pagar
300 kWh	R$ 75,00

Cada um dos quatro moradores toma um banho diário, um de cada vez, num chuveiro elétrico de 3 kW. Se cada banho tem duração de cinco minutos, o custo ao final de um mês (30 dias) da energia consumida pelo chuveiro é de

A) R$ 4,50.
B) R$ 7,50.
C) R$ 15,00.
D) R$ 22,50.
E) R$ 45,00.

14. (UFTM-MG–2010) Um resistor de resistência variável encontra-se submetido a uma diferença de potencial de intensidade invariável. Faz-se, então, com que o valor de sua resistência sofra uma modificação. Indicando-se com uma seta apontada para cima a ideia de crescimento da intensidade, e, de modo inverso, uma seta apontada para baixo, a ideia de decréscimo da intensidade, e abreviando as grandezas resistência elétrica, corrente elétrica e potência, respectivamente por R, i e P, das implicações apontadas, é **CORRETA** a

A) $R\uparrow \Rightarrow i\uparrow \Rightarrow P\uparrow$

B) $R\uparrow \Rightarrow i\uparrow \Rightarrow P\downarrow$

C) $R\uparrow \Rightarrow i\downarrow \Rightarrow P\downarrow$

D) $R\uparrow \Rightarrow i\downarrow \Rightarrow$ P (inalterada)

E) $R\uparrow \Rightarrow$ i (inalterada) $\Rightarrow P\uparrow$

15. (UNIFEI-MG–2007) O gráfico a seguir mostra como a corrente elétrica, no interior de um condutor metálico, varia com o tempo. **DETERMINE** a carga elétrica que atravessa uma seção do condutor em 6 (seis) segundos.

16. (UFJF-MG–2010) O gráfico mostra a potência elétrica, em kW, consumida na residência de um morador da cidade de Juiz de Fora, ao longo do dia. A residência é alimentada com uma voltagem de 120 V. Essa residência tem um disjuntor que desarma, se a corrente elétrica ultrapassar um certo valor, para evitar danos na instalação elétrica. Por outro lado, esse disjuntor é dimensionado para suportar uma corrente utilizada na operação de todos os aparelhos da residência, que somam uma potência total de 7,20 kW.

A) Qual é o valor máximo de corrente que o disjuntor pode suportar?

B) Qual é a energia em kWh consumida ao longo de um dia nessa residência?

C) Qual é o preço a pagar por um mês de consumo, se o 1 kWh custa R$ 0,50?

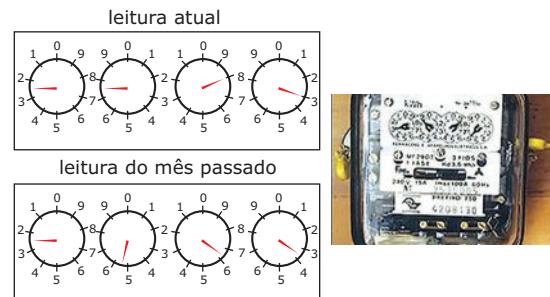
SEÇÃO ENEM

01. (Enem–2010) A resistência elétrica de um fio é determinada pelas suas dimensões e pelas propriedades estruturais do material. A condutividade (σ) caracteriza a estrutura do material, de tal forma que a resistência de um fio pode ser determinada conhecendo-se L, o comprimento do fio, e A, a área de seção reta. A tabela relaciona o material a sua respectiva resistividade em temperatura ambiente.

Tabela de condutividade	
Material	**Condutividade (S.m/mm²)**
Aluminio	34,2
Cobre	61,7
Ferro	10,2
Prata	62,5
Tungstênio	18,8

Mantendo-se as mesmas dimensões geométricas, o fio que apresenta menor resistência elétrica é aquele feito de

A) tungstênio.

B) alumínio.

C) ferro.

D) cobre.

E) prata.

02. (Enem–2010) A energia elétrica consumida nas residências é medida, em quilowatt-hora, por meio de um relógio medidor de consumo. Nesse relógio, da direita para esquerda, tem-se o ponteiro da unidade, da dezena, da centena e do milhar, Se um ponteiro estiver entre dois números, considera-se o último número ultrapassado pelo ponteiro. Suponha que as medidas indicadas nos esquemas seguintes tenham sido feitas em uma cidade em que o preço do quilowatt-hora fosse de R$ 0,20.

FILHO, A. G.; BAROLLI, E. *Instalação Elétrica*. São Paulo: Scipione, 1997.

O valor a ser pago pelo consumo de energia elétrica registrado seria de

A) R$ 41,80.

B) R$ 42,00.

C) R$ 43,00.

D) R$ 43,80.

E) R$ 44,00.

03. (Enem–2009) É possível, com 1 litro de gasolina, usando todo o calor produzido por sua combustão direta, aquecer 200 litros de água de 20 °C a 55 °C. Pode-se efetuar esse mesmo aquecimento por um gerador de eletricidade, que consome 1 litro de gasolina por hora e fornece 110 V a um resistor de 11 Ω, imerso na água, durante um certo intervalo de tempo. Todo o calor liberado pelo resistor é transferido à água. Considerando que o calor específico da água é igual a 4,19 $J.g^{-1}.°C^{-1}$, aproximadamente, qual a quantidade de gasolina consumida para o aquecimento de água obtido pelo gerador, quando comparado ao obtido a partir da combustão?

A) A quantidade de gasolina consumida é igual para os dois casos.

B) A quantidade de gasolina consumida pelo gerador é duas vezes maior que a consumida na combustão.

C) A quantidade de gasolina consumida pelo gerador é duas vezes menor que a consumida na combustão.

D) A quantidade de gasolina consumida pelo gerador é sete vezes maior que a consumida na combustão.

E) A quantidade de gasolina consumida pelo gerador é sete vezes menor que a consumida na combustão.

04. (Enem–2005) Podemos estimar o consumo de energia elétrica de uma casa considerando as principais fontes desse consumo. Pense na situação em que apenas os aparelhos que constam na tabela a seguir fossem utilizados diariamente da mesma forma.

Tabela: A tabela fornece a potência e o tempo efetivo de uso diário de cada aparelho doméstico.

Aparelho	Potência (kW)	Tempo de uso diário (horas)
Ar condicionado	1,5	8
Chuveiro elétrico	3,3	1/3
Freezer	0,2	10
Geladeira	0,35	10
Lâmpadas	0,10	6

Supondo que o mês tenha 30 dias e que o custo de 1 kWh é de R$ 0,40, o gasto com energia elétrica mensal dessa casa é de aproximadamente

A) R$ 135.

B) R$ 165.

C) R$ 190.

D) R$ 210.

E) R$ 230.

05. (Enem–2001) "[...] O Brasil tem potencial para produzir pelo menos 15 mil megawatts por hora de energia a partir de fontes alternativas. Somente nos Estados da região Sul, o potencial de geração de energia por intermédio das sobras agrícolas e florestais é de 5 000 megawatts por hora. Para se ter uma ideia do que isso representa, a usina hidrelétrica de Itá, uma das maiores do país, na divisa entre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, gera 1 450 megawatts de energia por hora."

Esse texto, transcrito de um jornal de grande circulação, contém, pelo menos, um erro conceitual ao apresentar valores de produção e de potencial de geração de energia. Esse erro consiste em

A) apresentar valores muito altos para a grandeza energia.

B) usar unidade megawatt para expressar os valores de potência.

C) usar unidades elétricas para biomassa.

D) fazer uso da unidade incorreta megawatt por hora.

E) apresentar valores numéricos incompatíveis com as unidades.

06. (Enem–2009) Os motores elétricos são dispositivos com diversas aplicações, dentre elas, destacam-se aquelas que proporcionam conforto e praticidade para as pessoas. É inegável a preferência pelo uso de elevadores quando o objetivo é o transporte de pessoas pelos andares de prédios elevados. Nesse caso, um dimensionamento preciso da potência dos motores utilizados nos elevadores é muito importante e deve levar em consideração fatores como economia de energia e segurança.

Considere que um elevador de 800 kg, quando lotado com oito pessoas ou 600 kg, precisa ser projetado. Para tanto, alguns parâmetros deverão ser dimensionados. O motor será ligado à rede elétrica que fornece 220 volts de tensão. O elevador deve subir 10 andares, em torno de 30 metros, a uma velocidade constante de 4 metros por segundo. Para fazer uma estimativa simples de potência necessária e da corrente que deve ser fornecida ao motor do elevador para ele operar com lotação máxima, considere que a tensão seja contínua, que a aceleração da gravidade vale 10 m/s^2 e que o atrito pode ser desprezado. Nesse caso, para um elevador lotado, a potência média de saída do motor do elevador e a corrente elétrica máxima que passa no motor serão, respectivamente, de

A) 24 kW e 109 A.

B) 32 kW e 145 A.

C) 56 kW e 255 A.

D) 180 kW e 818 A.

E) 240 kW e 1 090 A.

FÍSICA

07. (Enem–2009) Uma estudante que ingressou na universidade e, pela primeira vez, está morando longe da sua família, recebe a sua primeira conta de luz:

Medidor			Consumo	Leitura		Cód.	Emissão	Id. Bancária		
Número 7131312	Consumidor 951672	Leitura 7295	kWh 260	Dia 31	Mês 03	21	01/04/2009	Banco 222	Agência 999-7	Município S. José das Moças
Consumo dos últimos 12 meses em kWh										Descrição
253 Mar/08 247 Abr/08 255 Mai/08		278 Jun/08 280 Jul/08 275 Ago/08				272 Set/08 270 Out/08 280 Nov/08		285 Dez/08 286 Jan/09 288 Fev/09		Fornecimento ICMS
Base de Cálculo ICMS		Alíquota				Valor				Total
R$ 130,00		25%				R$ 32,50				R$ 162,50

Se essa estudante comprar um secador de cabelos que consome 1 000 W de potência e considerando que ela e suas 3 amigas utilizem esse aparelho por 15 minutos cada uma durante 20 dias no mês, o acréscimo em reais na sua conta mensal será de

A) R$ 10,00.
B) R$ 12,50.
C) R$ 13,00.
D) R$ 13,50.
E) R$ 14,00.

GABARITO

Fixação

01. C
02. C
03. A
04. Soma = 34
05. A) $R_{inicial} = 11\ \Omega$, $R_{final} = 5,5\ \Omega$
    B) P = 2 200 W
    C) R$ 6,60

Propostos

01. A
02. B
03. E
04. C
05. A
06. B
07. A
08. C
09. D
10. B
11. A
12. B
13. B
14. C
15. q = 0,18 C
16. A) I = 60 A
    B) E = 24 kWh
    C) R$ 360,00

Seção Enem

01. E
02. E
03. D
04. E
05. D
06. C
07. B